

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
მეტალურგთა საერთაშორისო კავშირი

ფოლადის მეტალურგია

საქართველოს განათლების სამინისტროს
მიერ დამტკიცებულია სახელმძღვანელოდ
უმაღლესი ტექნიკური სასწავლებლების
სტუდენტებისა და მაგისტრანტებისათვის

ავტორთა კოლექტივის ხელმძღვანელი და მთავარი
რედაქტორი, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი გ. ქაშაკაშვილი

თბილისი
„მეცნიერება“
2002

**ა. ბარათაშვილი, ა. გაბისიანი, გ. ლომთათიძე, ბ. შირიანაშვილი,
გ. ქაშაკაშვილი, ი. ქაშაკაშვილი**

უპა 669.18 ფოლადის მატალურბია: სახელმძღვანელო / ი. ბარათაშვილი, ა. გაბისიანი, გ. ლომთათიძე, ბ. შირიანაშვილი, გ. ქაშაკაშვილი, ი. ქაშაკაშვილი.—თბილისი: მეცნიერება, 2002.—792 გვ.

სახელმძღვანელოში განხილულია ფოლადის წარმოების სახეობანი ძველი დროიდან დღემდე. დიდი ადგილი აქვს დათმობილი კონვერტერში, მარტენისა და ელექტროდუმელებში ფოლადის დნობის თანამედროვე ტექნოლოგიური პროცესების აღწერას. მოცემულია ფოლადის წარმოების უწყვეტი ხერხის სხვადასხვა ვარიანტი, ღუმელს-გარე დამუშავების თანამედროვე მეთოდები, ფოლადის ჩამოსხმის ნაირსახეობანი. განხილულია ფოლადის წარმოების თეორიული საფუძვლები.

წიგნი განკუთვნილია უმაღლესი ტექნიკური სასწავლებლების სტუდენტებისა და მაგისტრანტებისათვის. იგი შეიძლება სასარგებლო იყოს აგრეთვე მატალურგიულ წარმოებასა და სამეცნიერო დაწესებულებებში მომუშავე ინჟინერ-ტექნიკური პერსონალისა და მეცნიერ-მუშაკებისათვის.

2601000000
M607(06) 2002

© „მეცნიერება“
2002

ISBN 999 40-735-0-8

**Бараташвили И. Б., Габисиани А. Г., Ломтатидзе Г. А.,
Мирианашвили Б. М., Кашакашвили Г. В., Кашакашвили И. Г.**

УДК 669.18 **Металлургия стали: учебник / Бараташвили И. Б., Габисиани А. Г., Ломтатидзе Г. А., Мирианашвили Б. М., Кашакашвили Г. В., Кашакашвили И. Г. Тбилиси: Мецниереба, 2002.–792с.:ил.–(на груз. яз.)**

В учебнике рассмотрены виды производства стали с древних времён по сегодняшний день. Большое внимание уделено описанию современных процессов производства стали в конвертерах, мартеновских и электропечах. Приведены разные варианты непрерывного сталеплавильного процесса, современные методы внепечной обработки стали, разновидности разливки стали. Рассмотрены теоретические основы производства стали.

Книга предназначена для студентов и магистрантов высших технических учебных заведений. Она может быть полезной также для инженерно-технического персонала и научных сотрудников металлургических предприятий и научных учреждений.

**I. B. Baratashvili, A. G. Gabisiani, G. A. Lomtadze, B. M. Mirianashvili,
G. V. Kashakashvili, I. G. Kashakashvili**

UDC 669.18 Metallurgy of steel: textbook / I. B. Baratashvili, A. G. Gabisiani, G. A. Lomtadze, B. M. Mirianashvili, G. V. Kashakashvili, I. G. Kashakashvili. Tbilisi: Metsniereba, 2002.—792 p.:il.—(Georgian).

Kinds of manufacturing since antiquity till today are considered in the textbook. Considerable attention is given to the description of present processes of manufacturing of steel in converters, open-hearth and electric furnaces. Different versions of continuous steel-smelting process, currently available methods of “off-furnace treatment” of steel, versions of steel casting are given. Theoretical bases of manufacturing of steel are considered.

The book is intended for students and masters of high technical educational institutions. It can be useful also for the engineers, technicians and scientific workers of the metallurgical plants and scientific institutes.

წიგნისიტიყვობა

საქართველო ოდიოგანვე ითვლებოდა რკინის მწარმოებელ ქვეყნად, თუმცა ჟამთა სვლისას რიგ ვითარებათა გამო ამ ძვირფასი ლითონის წარმოება ჩვენში საუკუნეების განმავლობაში იქნა მივიწყებული და მხოლოდ XX საუკუნის პირველი ნახევრიდან გახდა შესაძლებელი მეტალურგიული მრეწველობის აღორძინება საქართველოში, რამაც, თავისთავად ცხადია, განაპირობა სათანადო სპეციალისტების მომზადების აუცილებლობა.

მიუხედავად იმისა, რომ საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ნახევარ საუკუნეზე მეტია არსებობს მეტალურგიის ფაკულტეტი და შავი ლითონების მეტალურგიის კათედრა, დღემდე არ არსებობდა ქართულ ენაზე დაწერილი სახელმძღვანელო, რომელიც სრულად მოიცავდა ფოლადის მეტალურგიის კურსს და სტუდენტები, ძირითადად, სარგებლობდნენ რუსულენოვანი სახელმძღვანელოებით.

წინამდებარე წიგნი არის პირველი მცდელობა ქართულ ენაზე გამოგვეცა ფოლადის მეტალურგიის სრული კურსი. სახელმძღვანელოში შესულია ფოლადის წარმოების ყველა არსებული ტექნოლოგია. განსაკუთრებით დიდი ადგილი აქვს დათმობილი ფოლადის წარმოების თანამედროვე მეთოდებს. სახელდობრ, სრულფასოვნად არის განხილული ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის სხვადასხვა ვარიანტი. ფოლადის დნობის ტექნოლოგია ზემოქავე რკალურ და ინდუსტრიულ ელექტროღუმელებში, ფოლადის წარმოება მარტენის პროცესის სხვადასხვა სახეობით, ფოლადის უწყვეტი ხერხით წარმოების ვარიანტები, თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების თანამედროვე მეთოდები, ფოლადის ჩამოსხმა ბოყვებში და უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე, ლითონის ზოდის აღნაგობა და კრისტალიზაციის დროს მიმდინარე პროცესები.

წიგნში სრულყოფილად არის წარმოდგენილი აირადი ნარევებისა და ნახშირბადის წვის თერმოდინამიკა; ფოსფორის, გოგირდის, ჟანგბადის და სხვა ქიმიური ელემენტების ფოლადში ხსნადობის ფიზიკურ-ქიმიური საფუძვლები; ფოლადის განუანგვისა და ლეგირების თერმოდინამიკა და კინეტიკა; არალითონური ჩანართების გენეზისი და მათი გავლენა ფოლადის ხარისხზე.

წიგნზე მუშაობის დროს ავტორები ყურადღებას აქცევენ უცხო სიტყვებისა და ტერმინების ქართულ ლექსიკასთან შესაბამისობაში მოყვანის საკითხებს.

ავტორები წინასწარ უხდიან მადლობას ყველას, ვინც კი მოისურვებს მიაწოდოს მათ თავიანთი შენიშვნები და მოსაზრებები.

I ბ ა ნ ე მ ო შ ი ლ ე ბ ა

თ ა ვ ი I

ზ ო ბ ა ლ ი ნ ა წ ი ლ ი

1.1.1. რკინისა და მისი შენადნობების როლი კაცობრიობის განვითარების ისტორიაში

კაცობრიობის განვითარების ისტორია მთიკავს სამ უდიდეს პერიოდს: ქვის, ბრინჯაოსა და რკინის ხანას. თითოეული მათგანი სათვის დამახასიათებელია ადამიანის ცხოვრების საარსებო პირობებისათვის აუცილებელი საბრძოლო, სანადირო და სამეურნეო იარაღებისა თუ სხვადასხვა სამარჯვების წარმოება შესაბამისი მასალის გამოყენებით.

უძველეს ქვის ხანაში (პალეოლითში), ჩვენს წელთაღრიცხვამდე 800-დან 10 ათას წლამდე, პირველყოფილი ადამიანი იყენებდა კაუსის, კვარცისა და ობსიდიანისაგან დამზადებულ იარაღს.

ახალი ქვის ანუ ნეოლითის ხანაში, რომელიც გრძელდებოდა 5-7 ათასი წლის განმავლობაში, ადამიანმა საგრძნობლად გააუმჯობესა ქვის დამუშავების ტექნიკა და შექმნილი იარაღების გამოყენებით საფუძველი ჩაუყარა მესაქონლეობასა და მიწათმოქმედებას. დაახლოებით იმავე პერიოდში გაიცნო მან თვითნაბადი სპილენძი, ოქრო, ვერცხლი და მეტეორიტული რკინა.

ისტორიულ-არქეოლოგიური მონაცემებით, ახლო აღმოსავლეთის, ეგვიპტისა და ჩინეთის ხალხი რკინას იცნობდა ჯერ კიდევ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე მე-5 ათასწლეულიდან. სავარაუდოა, რომ ეს იყო მეტეორიტული რკინა. ასეთი რკინის ნიმუშები ნაპოვია ეგვიპტისა და მესოპოტამიის სამარხებში. მათ მეტეორიტულ წარმოშობას ადასტურებს იქაურ ხალხთა მიერ რკინისათვის შერქმეული სახელები. ძველეგვიპტური „ბინიპეტ“ ნიშნავს ციურ ლითონს, ხოლო მესოპოტამიური „ან-ბარ“-ი – ჯიურ რკინას. მისი შემდგომი სახელწოდება „ფერუმ“ დღემდის იხმარება. ბერძნულ-ლათინური წარმოშობისაა და ნიშნავს მაგარს, მტკიცეს.

ჩვენს წელთაღრიცხვამდე VII-VI ათასწლეულში ადამიანმა ისწავლა სპილენძის გამოდნობა, ხოლო უფრო მოგვიანებით, IV-III

ათასწლეულებში, გაეცნო მის შენადნობს – ბრინჯაოს. აქედან აიღო სათავე ბრინჯაოს ხანამ.

ისტორიის ცალკეული დარგების შემსწავლელ მეცნიერთა ვარაუდით, ბრინჯაო თავდაპირველად შემთხვევით იქნა მიღებული. სპილენძთან შედარებით ბრინჯაოს უფრო მაღალმა მექანიკურმა თვისებებმა წარმოშვა ბრინჯაოს ანუ სპილენძის შენადნობის თვისებების გაუმჯობესების საშუალებების ძიების მოთხოვნილება, რის შედეგადაც მიღებულ იქნა რამდენიმე სახის ბრინჯაო. მათი გამოყენება სხვადასხვა დანიშნულებით ხდებოდა: საბრძოლო იარაღების, საყოფაცხოვრებო ნივთების, სამკაულებისა და სხვ. დასამზადებლად.

აღნიშნულ პერიოდში ადამიანთა ძირითად საქმიანობად ითვლებოდა სხვისი მიწების მიტაცება და ბრძოლა ცხოვრების უკეთესი პირობების მოსაპოვებლად. ამ მიზნების მისაღწევად, რასაკვირველია, პირველ რიგში აუცილებელი იყო საბრძოლო იარაღების გაუმჯობესება. და მოხდა ისე, რომ ბრინჯაომ თავისი სიმტკიცით საბრძოლო და სხვა სამეურნეო იარაღებიდან გამოაძევა სპილენძი. თანდათანობით ასევე შეცვალა ბრინჯაოც რკინამ, როგორც უფრო საღმა მასალამ. მიუხედავად იმისა, რომ მისი მიღება და დამუშავება იმ პერიოდისათვის მეტად რთულ ტექნოლოგიურ პროცესებთან იყო დაკავშირებული.

ჩვენს წელთაღრიცხვამდე მე-2 ათასწლეულის პირველ ნახევარში ადამიანმა დაიწყო რკინის მადნიდან რკინის მიღება. მკვლევართა შორის დღემდე არ არსებობს საერთოდ აზრი, თუ ვინ და როდის მიაგნო რკინის მიღების საიდუმლოებას. ძალზე ბევრი მეცნიერი თვლის რკინის სამშობლოდ ჩინეთს, ინდოეთს. ბაბილონს და ეგვიპტეს, მაგრამ არც არქეოლოგიური კვლევების მასალებიდან და არც თქმულება-ლეგენდებიდან არ ჩანს, რომ ამ ქვეყნებში მოხდა რკინის მიღების საიდუმლოების ამოხსნა.

არსებობს საწინააღმდეგო აზრიც. კერძოდ, ჩეხი მკვლევარის ბ. პროზნის თანახმად, ნილოსისა და ეფფრატის არსებული გეოგნოსტიკური პირობების გამო შეუძლებელი იყო ეგვიპტე-ბაბილონში რკინის წარმოებისა და დამუშავების ხელოვნების აღმოცენება. მისი სამშობლო უნდა ვეძიოთ კავკასიაში და ამიერკავკასიაში. ქართველ და უცხოელ მეცნიერთა მრავალი მეცნიერული ნაშრომის ანალიზის საფუძველზე მივდივართ დასკვნამდე, რომ რკინის გამოდნობის ხერხი არ წარმოადგენს რომელიმე ერთი ქვეყნის ან ერის პრიორიტეტულ მონაპოვარს. იგი ერთდროულად, ან დროის მცირე მონაკვეთის განსხვავებით, დამუშავდა სხვადასხვა ადგილას.

რკინა და მისი შენადნობები წარმოადგენს თანამედროვე ცივილიზაციის საფუძველს. მათ გარეშე შეუძლებელი იქნებოდა ტექნიკის განვითარებისა და ცხოვრების თანამედროვე დონის მიღწევა. ძნელია დაასახელო სახალხო მეურნეობის რომელიმე დარგი, სადაც არ გამოიყენება რკინა. მის გარეშე წარმოუდგენელია თანამედროვე თავდაცვის ტექნიკის, მანქანათმშენებლობის, ტრანსპორტის, ატომური ენერგეტიკის, სარაკეტო ტექნიკის, ხელოვნურ თანამგზავრთა წარმოების, სოფლის მეურნეობის მანქანათმშენებლობისა და სხვა სფეროების განვითარება. იგი წარმოადგენს ძირითად საკონსტრუქციო მასალას. მართალია, XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაიწყო ახალი საკონსტრუქციო მასალების (პლასტმასების, კერამიკული მასალების) და ყვერადი ლითონების კონსტრუქციების წარმოება. მაგრამ ისინი მაინც ვერ უწევენ კონკურენციას რკინას. ამასთან ერთად, ამ ახალი საკონსტრუქციო მასალების საწარმოებლად საჭიროა რკინისაგან დამზადებული სპეციალური მანქანა-იარაღები.

რკინის უდიდეს უპირატესობას სხვა მასალებთან შედარებით წარმოადგენს ისიც, რომ მისგან დამზადებული მანქანა-დანადგარების მწყობრიდან გამოსვლის შემდეგ შესაძლებელია მათი გადადნობა კაზმში საჭირო ჯართის სახით.

ამრიგად, კაცობრიობას სახალხო მეურნეობის ყველა სფეროსათვის ლითონზე უფრო მტკიცე და ფართო მოხმარების საკონსტრუქციო მასალა დღემდე არ შეუქმნია. თავდაცვის სტრატეგიული პრიორიტეტი ლითონებმა მე-3 ათასწლეულისათვისაც შეინარჩუნა, მაგრამ მათი გამოყენების მთავარი დედაარსი ცივილიზაციის პერიოდში იყო და იქნება წარმოების საშუალებათა შექმნის საფუძველი. ჩვენს პლანეტაზე მისი არსებობიდან დღემდე ადამიანის მიერ შექმნილ ძირითად ფონდებში, საერთო ქონებაში, ყველაზე დიდი მოცულობის კაპიტალი ლითონებზე მოდის.

1.1.2. ფოლადის წარმოების განვითარების ისტორია

უძველესი დროიდან დღემდე რკინის წარმოების ისტორიამ დიდი და რთული გზა განვლო. რა თქმა უნდა, ვერც მაშსტაბებით და ვერც ხარისხით რკინის წარმოების ძველი ხერხები ვერ შეედრება თანამედროვე ტექნოლოგიას. მიუხედავად ამისა, კაცობრიობის განვითარების შესაბამის ეტაპებზე რკინის მიღების იმდროინდელ ხერხებს პროგრესული მნიშვნელობა ჰქონდა და ქვეყნის ეკონომიკისა თუ თავდაცვისუნარიანობის განმსაზღვრელი იყო.

თავდაპირველად რკინის მიღება წარმოებდა ცივბერვით ქუ-
რებში. რკინის წარმოების შემდეგ საფეხურებს წარმოადგენდა
გუნდური და პუდლინგის ხერხები. ამ მეთოდებით ხდებოდა რკინის
ცომისებურ მდგომარეობაში მიღება. ჯერ XIX საუკუნეში, პენრი
ბესემერის მიერ თხევადი ფოლადის კონვერტერში მიღების ხერხის
აღმოჩენამ, შემდეგ მარტენის მიერ შექმნილ ღუმელში მისი გა-
მოდნობის ტექნოლოგიის შემუშავებამ, მერე ჟანგბადკონვერტე-
რული პროცესის გაერცელებამ და ბოლოს, ზემოთაღნიშნული
ღუმელების გამოყენებამ უდიდესი გარდატეხა შეიტანა მეტალურ-
გიის დარგის განვითარებაში. ამ გამოგონებათა დანერგვამ
გამოიწვია ტექნიკის ყველა დარგის არნახული პროგრესი. რამაც
განსაკუთრებულ დონეს და მასშტაბებს მიაღწია XX საუკუნეში.

ჯერ კიდევ ბესემერის პროცესის აღმოცენებამდე, XVIII საუ-
კუნეში, შავი ლითონების (რკინის შენადნობების) წარმოებაში
მსოფლიოში პირველ ადგილზე რუსეთი იყო. რუსმა მეტალურგებმა
თხევადი ლითონების წარმოებაც აქტიურად დაიწყეს. მაგრამ
მეფის რუსეთში კაპიტალიზმის განვითარების შეფერხებამ თავისი
დადი დაასვა მეტალურგიასაც. მსოფლიოში მოწინავე მეტალურ-
გიული ქვეყნიდან რუსეთი ერთ-ერთ ჩამორჩენილ ქვეყნად იქცა.

1913 წელს გერმანიასთან პირველი მსოფლიო ომის დაწყების
წინ რუსეთის მეტალურგიამ მსოფლიოში პირველიდან მეხუთე
ადგილზე გადაინაცვლა და აწარმოვა მხოლოდ და მხოლოდ 4.3
მლნ ტ ფოლადი. რევოლუციითა და მის შემდგომ სამოქალაქო
ომით გამოწვეული ნგრევის შედეგად რუსეთის მეტალურგია კიდევ
უფრო მეტად დაზარალდა და 1920 წელს ფოლადის წლიურმა
წარმოებამ შეადგინა 0,194 მლნ ტ. გასაბჭოებულმა რუსეთმა
სამოქალაქო ომის შემდეგ დაიწყო მეტალურგიის აღორძინება.
რუსი მეტალურგების გვერდით ამ საქმეში დიდი წვლილი შეიტანა
ჩვენმა თანამემამულემ. ტრესტ „ურალმეტის“ (შემდგომში „კოს-
ტოკოსტალის“) ტექნიკურმა დირექტორმა, პროფესორმა ნიკო-
ლოზ ქაშაკაშვილმა. მან პროფესორ სოკოლოვთან ერთად პირველ-
მა განახორციელა ბრძმედში თუჯის უკოქსო გამოდნობა კუნეც-
კის მდიდარი ნედლი ქვანახშირის გამოყენებით, ვინაიდან იმ
დროის კოქსქიმიური წარმოება არ იყო განვითარებული. ნიკოლოზ
ქაშაკაშვილის ინიციატივით 1925 წელს ჩატარდა რუსეთის მეტა-
ლურგ-მებრძმედეთა პირველი ყრილობა, რომელსაც ესწრებოდნენ
ცნობილი მეცნიერები: მ. პავლოვი, ვ. გრუმ-გრუმიანილო, ი. სოკო-
ლოვი და სხვები. ნ. ქაშაკაშვილმა და პროფესორმა სოკოლოვმა
თავიანთი მოხსენებებით ყრილობაზე დააკანონეს რუსეთის ბრძმე-
დების გადაყვანა ხის ნახშირიდან მინერალურ ქვანახშირზე.

აღნიშნულმა პროგრესულმა ტექნოლოგიამ საგრძნობლად გაზარდა როგორც თუჯის, ასევე ფოლადის წარმოება და მეტალურგიის დარგი აღმაავალი გზით განვითარდა. რუს მეტალურგებთან ერთად მეტალურგიის განვითარებას ემსახურებოდა ჩვენი მეორე თანამემამულეც, შემდგომში ცნობილი მეტალურგი და მათემატიკოსი პროფესორი გიორგი ნიკოლაძე, ჯერ რუსეთსა და უკრაინაში, ხოლო რევოლუციის შემდეგ – საქართველოში.

აშენდა მრავალი მეტალურგიული კომბინატი: მაგნიტოგორსკის, კუზნეცკის, ნიუნი-ტაგილის. მიმდინარეობდა უკრაინის ძველი მეტალურგიული ქარხნების რეკონსტრუქცია და ახალი ქარხნების მშენებლობა. ფაშისტური გერმანიის მიერ მეორე მსოფლიო ომის დაწყების წინ საბჭოთა კავშირში 1940 წ. გამოდნა 18.3 მლნ ტ ფოლადი. ომის პერიოდში სასწრაფოდ ხდებოდა უკრაინის ქარხნების დემონტაჟი, გადატანა და ახალი ქარხნების მშენებლობა ურალში. მთელი სიმძიმე ფოლადის გამოდნობაში ურალის მეტალურგიულ ქარხნებზე გადავიდა.

მეტალურგიული საწარმოების ევაკუაციის მიუხედავად, უკრაინის ქარხნების ოკუპაციაში მოქცევამ საგრძნობლად შეამცირა მეტალურგიული დარგის წარმოება და 1945 წელს საბჭოთა კავშირში ფოლადის წარმოებამ შეადგინა მხოლოდ 12.3 მლნ ტ.

ჯერ კიდევ 1940 წელს, ფაშისტური გერმანიის მიერ ომის დაწყებამდე ნ. ქაშაკაშვილი დაინიშნა ამიერკავკასიის მეტალურგიული მშენებარე ქარხნის მთავარ ინჟინრად და დირექტორის მოვალეობის შემსრულებლად. აშენდა კიდევ ქარხნისთვის საჭირო შენობები, მაგრამ ომის დაწყების გამო მშენებლობა შეჩერდა და აგებული ნაგებობები გამოიყენეს ტაგანროგიდან ევაკუირებული 31-ე საავიაციო ქარხნის განთავსებისთვის.

1944 წ. ხელახლა დაისვა საკითხი ამიერკავკასიის მეტალურგიული ქარხნის მშენებლობის შესახებ. ნ. ქაშაკაშვილმა რესპუბლიკის ხელმძღვანელობასთან ერთად შეარჩია ქარხნის მშენებლობისათვის თბილისიდან სამხრეთ-აღმოსავლეთით მდებარე ტერიტორია – ბოსტან-ქალაქი, დღევანდელი ქ. რუსთავი. მშენებარე მეტალურგიული ქარხნის დირექტორად დაინიშნა ნ. გომელაური. ორი ნიკოლოზის მუხლმთედრეკელი მრავალწლიანი შრომის შედეგად 1950 წლის 27 აპრილს მარტენის საამქროს №1 ლუმელიდან გამოშვებული ფოლადის ნაღობმა დასაბამი მისცა რუსთავის მეტალურგიული ქარხნის ამოქმედებას. შემდეგ ექსპლუატაციაში შევიდა ბლუმინგი, მილნამზადების საამქრო, მილსაგლინაჟი აგრეგატები – 140 და 400, სორტული ნაგლინის საამქრო, ბოლოს კი – ბრძმედისა და კოქსქიმიური საამქროები. 1954 წლიდან რუსთა-

ვის მეტალურგიულმა ქარხანამ სრული მეტალურგიული ციკლით დაიწყო მუშაობა და ამოქმედებიდან ნახევარი საუკუნის განმავლობაში გატარებული სარეკონსტრუქციო სამუშაოებითა და წარმოების გაფართოებით შემდეგ წლიურ საწარმოო სიმძლავრეებს მიაღწია:

- კოქსი – 700 ათასი ტ.
- აგლომერატი – 2,5 მლნ ტ.
- თუჯი – 800 ათასი ტ.
- ფოლადი – 1.45 მლნ ტ.
- ნაგლინი – 1,2 მლნ ტ.
- მიღები – 560 ათასი ტ.
- სორტული ნაგლინი – 135 ათასი ტ.

II მსოფლიო ომის შემდგომ პერიოდში საბჭოთა ქვეყნის სახალხო მეურნეობის პერსპექტიული განვითარების პროგრამა სისტემატურად ითვალისწინებდა ფოლადის წარმოების განუხრელ ზრდას, რამაც 1986 წელს რეკორდულ მანევრებელს – 160.5 მილიონ ტონას მიაღწია წელიწადში და მსოფლიოში I ადგილზე გავიდა. საბჭოთა კავშირსა და მსოფლიოში ფოლადის წარმოების ზრდის კინეტიკა მოცემულია ცხრილში I.1.

ცხრილი I.1

ფოლადის წარმოება, მლნ ტ წელიწადში

წელი	სსრკ	მსოფლიო
1913	4,23	76,9
1928	4,25	121,0
1940	18,3	139,3
1945	12,3	--
1950	27,2	191,6
1960	65,3	345,5
1970	115,9	597,0
1979	—	748,0
1980	149	717,7
1982	—	645,4
1984	154	713
1986	160,5	714,5
1998	74,4*	774,4

საბჭოთა კავშირის დაშლის შემდეგ (მასში შემაჯავლ ქვეყნებში) საგრძნობლად დაეცა ფოლადის წარმოება 1992 წელთან შედარებით, ხოლო 1998 წ. შეადგინა 74.4 მლნ ტ.

* პოსტსაბჭოური სისტემის ქვეყნებში.

შეიცვალა აგრეთვე ფოლადის გამოდნობის სტრუქტურაც სადნობი აგრეგატების მიხედვით. გაიზარდა კონვერტერული და ელექტროფოლადის წილი, ხოლო მარტენის ფოლადის წილი საგრძნობლად შემცირდა. ამასთან ერთად უნდა აღინიშნოს, რომ მოწინავე მეტალურგიულ ქვეყნებში ფოლადის დნობის მარტენის პროცესი აღარ გამოიყენება. იგი შემორჩა მხოლოდ ყოფილი საბჭოთა კავშირის რესპუბლიკებში, ჩინეთსა და ზოგიერთ სხვა ქვეყანაში (ცხრილი 1.2).

(ცხრილი 1.2

ფოლადის წარმოება აგრეგატების მიხედვით

წელი	სულ მლნ ტ	ხვედრითი წილი, %		
		კონვერტერი	ელექტროლუშელი	მარტენი
1965	454,9	25,6	12,7	61,0
1969	573,6	41,8	14,1	43,9
1970	593,4	44,9	14,5	40,2
1998	774,4	59,4	33,9	6,7

ქვეყნების სიძლიერის მახასიათებლად იყენებენ როგორც ფოლადის წარმოების მთლიან მოცულობას, ასევე ერთ სულ მოსახლეზე მოხმარებული ლითონის რაოდენობას. ამ მხრივ საბჭოთა კავშირი, ფოლადის წარმოების დიდი რაოდენობის მიუხედავად, საგრძნობლად ჩამორჩებოდა ბელგიას, იაპონიას, აშშ-ს, გფრ-ს, კანადას და სხვა ქვეყნებს (ცხრილი 1.3), ხოლო წინ უსწრებდა ბრიტანეთს, პოლონეთს, იტალიასა და ესპანეთს.

(ცხრილი 1.3

ფოლადის წარმოება ერთ სულ მოსახლეზე, კგ.

ქვეყანა	წლები					
	1970	1973	1974	1975	1976	1977
გფრ	732	—	858	654	690	637
ბელგია	1303	1587	1654	1173	1238	1147
იაპონია	903	1104	1068	914	952	901
აშშ	596	—	638	507	552	553
ინგლისი	508	—	400	361	398	365
კანადა	525	—	606	571	572	583
საფრანგეთი	468	—	514	407	439	417
სსრკ	477	—	542	555	564	564
საქართველო	267	267	327	327	327	327

1.1.3. თუჯის ფოლადად გადამუშავების არსი

თუჯი და ფოლადი რკინისა და ნახშირბადის შენადნობებია. ყველა ძირითადი ელემენტის (C, Si, Mn, S, P) შემცველობა ფოლადში რამდენჯერმე ნაკლებია თუჯთან შედარებით, მაგრამ მთავარი განმასხვავებელი ნიშანი მაინც ნახშირბადის შემცველობაა. თუჯი შეიცავს 2,14 %-ზე მეტ ნახშირბადს. ხოლო ფოლადი კი ნაკლებს, ამიტომ რკინა-ნახშირბადის დიაგრამაზე 2,14 % ნახშირბადამდე ფოლადის ზონაა. მის ზემოთ – თუჯის. თუჯიცა და ფოლადიც ნახშირბადის გარდა შეიცავს აუცილებელ ელემენტებს: სილიციუმს, მანგანუმს და მანეე მინარეებს – ფოსფორსა და გოგირდს. თუჯი და ფოლადი ამ ელემენტების შემცველობის მხრივაც განსხვავდება ერთმანეთისაგან. თუჯში ეს ელემენტები უფრო მეტი რაოდენობითაა დასაშვები ჩვეულებრივ ფოლადებთან შედარებით. ზოგიერთი თუჯი ჩამოთელილი აუცილებელი ელემენტის გარდა შეიცავს ნიკელს, ქრომს, ვანადიუმს, ტიტანს და ეს ძვირად ღირებული ელემენტები თუჯში ხვდება მადნებიდან ბრძმედის აღმდგენელ გარემოში ლითონის გამოდნობის დროს მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესების შედეგად. ხოლო ფოლადში ისინი სპეციალურად შეაქვთ.

ამრიგად, მალეგირებული ელემენტები უნდა მივიჩნიოთ სასარგებლო მინარეებად. რაც შეეხება თუჯსა და ფოლადში შემავალ აუცილებელ ელემენტებს, მათგან ნახშირბადი, სილიციუმი და მანგანუმი სასარგებლოა, ხოლო ფოსფორი და გოგირდი მანეე მინარეებია, რომელთა შემცველობა გათვალისწინებულ ზღვრებს ზემოთ დაუშვებელია.

ფოლადის მიღების თანამედროვე ხერხები ითვალისწინებს თუჯის გადამუშავებას სხვა საკაზზე მასალებთან ერთად ზედმეტი რაოდენობის მინარეების მოცილების მიზნით. ძირითადად საჭიროა ნახშირბადის, ფოსფორისა და გოგირდის კონცენტრაციების დაყვანა ფოლადის სტანდარტით გათვალისწინებულ რაოდენობამდე. ნახშირბადის დაყვანა სტანდარტულ რაოდენობამდე საჭიროა ფოლადის მექანიკური და სხვა თვისებების მანეეგებელთა (მაგალითად სიმტკიცისა და პლასტიკურობის) დონეების დამაკმაყოფილებელი შეხამებისათვის.

ფოსფორი ამყფებს ფოლადს დაბალტემპერატურულ პირობებში, ე.ი. ანიჭებს მას ცივმეტეხობის* თვისებას. დაბალტემპერატურულ პირობებში მექანიკური ზემოქმედებისას მალაფოსი-

* რედაქტორისაგან: ცივმეტეხობა იგივეა, რაც ცივტეხადობა.

ფორიანი ფოლადი იმსხვრევა. ამის გამო ფოლადის დნობის დროს სასურველია ფოსფორის მინიმალურ შემცველობამდე დაყვანა.

რაც შეეხება გოგირდს, იგი საპირისპიროდ მოქმედებს. გოგირდიანი ფოლადი ირღვევა ცხელ მდგომარეობაში შექანიკური ზემოქმედებისაგან როგორც გამყარება-დაკრისტალეებისას, ისევე – გლინვის ან ჭკვივისას. ამრიგად, გოგირდის ზეგავლენით ფოლადი იძენს ე.წ. ცხელმეტყობის (წითელმეტყობის) უნარს. ამიტომ, ფოლადის გამოდნობისას სასურველია თუჯში გოგირდის მინიმალური შემცველობა და აუცილებელია მისი შემდგომი შექცობა მზა ლითონში დასაშვებ დონემდე.

სილიციუმისა და მანგანუმის მოცილება არაა აუცილებელი. მაგრამ ვინაიდან თუჯის გადაშუშაება ყოლადად დაუანაკეთი პროცესია, ეს მინარეები ძალაუნებურად იუნგება. მათ მერე იუნგება ნახშირბადი. ამავე დროს იუნგება თუჯში მადნებიდან მოხვედრილი სხვა ელემენტები, რომლებსაც შეუძლიათ ფოლადის თვისებების გაუმჯობესება. ფოლადში ისინი რჩებიან მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ რკინაზე ნაკლები ნათესაობა (სწრაფვა) აქვთ ჟანგბადთან (მაგალითად Ni, Mo, Cu). ზოგი მათგანი იუნგება ნახშირბადთან ერთად, თუ აღნიშნული ნათესაობის მწკრივში რკინის შემდეგაა მოთავსებული (Cr, Mn, V და სხვა). დნობის დამთავრების შემდეგ ფოლადის ხარისხის გასაუმჯობესებლად განჟანგვა-ლეგირებისას ფეროშენადნობების საშუალებით შეაქვთ სილიციუმი და მანგანუმი. ლეგირებისთვის იყენებენ სხვა ისეთ ქიმიურ ელემენტებსაც, როგორიცაა ქრომი, ნიკელი, ვოლფრამი, ვანადიუმი, ტიტანი და ა.შ. შესაბამისი ფეროშენადნობების სახით.

1.1.4. ფოლადის წარმოების ხერხების კლასიფიკაცია

ფოლადების წარმოების ოთხ ათასწლოვან ისტორიაში მიღების ხერხების მიხედვით ცნობილია მყარ, ცომისებრ და თხევად მდგომარეობაში მიღებული ფოლადები.

მყარია ღრუბლოვანი და ელექტროლიზური რკინა. ცომისებრია – ცივბერვითი, გუნდური, პუდლინგისა და ასტონ-ბაიერსის რკინა. რაც შეეხება თხევადს, ამ ჯგუფს მიეკუთვნება სპეციალურ ქოთნებში (ტიგელებში), კონვერტერებში, მარტენისა და ელექტროლუმელებში გამოდნობილი ფოლადები.

ზემოჩამოთვლილ პროცესებში, მიღების გზების მიხედვით, განასხვავებენ ფოლადის ორ ჯგუფს:

- 1) პირდაპირი გზით მიღებული ფოლადები;

2) გადამუშავების გზით მიღებული ფოლადები.

პირდაპირი გზით მიიღება ღრუბლოვანი და ციებერეოთი რკინა ცომისებრი გუნდის სახით. ორივე შემთხვევაში რკინის მიღება ხდება უშუალოდ მადნიდან მისი აღდგენით. ამიტომაც დაერქვა რკინის პირდაპირი გზით მიღების ხერხები. ორივე ეს პროცესი ერთსაფეხურიანია და ტარდება ერთ აგრეგატში.

გადამუშავების გზით ფოლადის მიღება წარმოადგენს ორსაფეხურიან პროცესს. თავდაპირველად ხდება თუჯის მიღება, ხოლო შემდგომ კი – მისი გადამუშავება ფოლადად. დნობა ტარდება ერთ ან ორ სხვადასხვა აგრეგატში. ერთ აგრეგატში გადამუშავების გზით ფოლადი მიიღება გუნდური პროცესით. ჯერ ლებულობენ თუჯს, შემდეგ კი იმავე აგრეგატში თუჯს გარდაქმნიან ფოლადად. რაც შეეხება ორ აგრეგატში დნობას, ჯერ ხდება თუჯის მიღება ბრძმედში, შემდეგ კი – მისი გადამუშავება ფოლადად მესორე აგრეგატში. ასეთია პუდლინგის, ასტონ-ბაიერის და თხევადი ფოლადის მიღების ყველა თანამედროვე პროცესი: დნობა კონვერტერში და მარტენისა თუ ელექტროლუმელებში.

ქოთნური ანუ ტიგელური ხერხით თხევადი ფოლადის მიღება ფაქტიურად წარმოადგენს ფოლადის გადადნობის პროცესს. ამ ხერხით ხდება გამოსადნობი ფოლადის მსგავსი კაზმის გადადნობა. საკაზმე მასალებად გამოიყენება დაბალფოსფორიანი და დაბალგოვირდიანი ჯართი, რაც განაპირობებს მაღალხარისხივანი ფოლადის მიღებას.

თ ა ვ ი II

რკინის პირდაპირი მიღების ხერხები

1.2.1. მეტალურგიის განვითარების ძირითადი ეტაპები უძველესი დროიდან დღემდე

სიტყვა „მეტალურგია“ წარმოდგება ძველბერძნულიდან. იგი ნიშნავს მადნის მოპოვებას და გადამუშავებას. კაცობრიობის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე მეტალურგია წარმოადგენს მეცნიერების, ტექნიკისა და მრეწველობის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს დარგს, რომელიც მოიცავს მადნების მოპოვებას, მათი სხვა მასალებთან ერთად ან მხოლოდ ამ უკანასკნელთა გადა-

მუშავებით სასურველი ქიმიური შედგენილობის, შინაგანი აღნაგობის (სტრუქტურის) და გარეგნული ფორმის ლითონებისა თუ შენადნობების მიღებას სახალხო მეურნეობის ყველა დარგის მოთხოვნილებათა უზრუნველსაყოფად.

მეტალურგია იყოფა ორ დარგად: შავი მეტალურგია და ფერადი მეტალურგია. შავ მეტალურგიას მიეკუთვნება რკინის შენადნობების: თუჯის, ფოლადისა და ფეროშენადნობების წარმოება. მათი წილი, ლითონების საერთო რაოდენობის წარმოებაში, არის 95 %. ფერადი მეტალურგია მოიცავს სპილენძის, ალუმინის, თუთიის, კალის, ტყვიის, ნიკელის, კობალტის, ტიტანის და სხვა ფერადი ლითონების წარმოებასთან ერთად ძვირფასი ლითონების – ოქროს, ვერცხლის, პლატინის და სხვათა წარმოებას.

აღამიანი თავდაპირველად გაეცნო თვითნაბად ლითონებს: სპილენძს, ოქროს, ვერცხლს და მეტეორიტულ რკინას. ამ მასალებიდან ქმნიდნენ ნაკეთობებს ცივი ჭედვით, რაც ძნელად ხორციელდებოდა, ხოლო მეტეორიტულ რკინას საერთოდ ვერ ჭედდნენ. შემდგომში ცხელმა ჭედვამ აღამიანს გაუადვილა თვითნაბადი ლითონებიდან ნაკეთობების შექმნა.

ისტორიულ-არქეოლოგიური წყაროებით ირკვევა, რომ აღამიანმა პირველად სპილენძის გამოდნობა ისწავლა. მცირე აზიის სამხრეთ-დასავლეთში ნაპოვნია ჩვენს წელთაღრიცხვამდე VII–VI ათასწლეულში სპილენძის დნობის კვალი. V–IV ათასწლეულში დაიწყო სპილენძის უანგეული მადნების გადამუშავება, რაც გაცილებით იოლი იყო, ვიდრე სპილენძის სულფიდური მადნებისა. ძველი წელთაღრიცხვის IV–III ათასწლეულში დაიწყეს სპილენძისა და კალის შენადნობის – ბრინჯაოს წარმოება. აქედან იწყება ბრინჯაოს ხანა. ამ დროისათვის სპილენძის და ბრინჯაოს წარმოების მსხვილი ცენტრი იყო კავკასია.

საქართველოში კალა არ მოიპოვებოდა და ამიტომ ბრინჯაო მზადდებოდა დარიშხანთან შედნობით. ქართული ბრინჯაო ძირითადად ამით განსხვავდება სხვა ქვეყნებში ნაწარმოები ბრინჯაოსაგან. მეტალურგიის განვითარებასთან ერთად დაიწყეს სპილენძისა და თუთიის შენადნობის – თითბრის გამოდნობა. კავკასიური ტომებიდან ძალზე დაწინაურებული იყვნენ ამ მხრივ მუსკები (მესხები). არსებობს აზრი, რომ სპილენძისა და თითბრის გერმანული სახელწოდება „მესინგ“ ამ ხალხის სახელთან არის დაკავშირებული.

თავდაპირველად ბრინჯაოს იყენებდნენ როგორც საბრძოლო, ისე შრომის იარაღებისა და სამკაულების დასამზადებლად. შემდგომში მისგან ამზადებდნენ სამრეკლოს ზარებს და XIX საუკუნის

შუა ხანებამდე - ზარბაზნის ლულებს. შემდეგ დაიწყო მისი გამოყენება მანქანათმშენებლობაში. ამჟამად აღნიშნულ სხვადასხვა ქიმიური შედგენილობის ბრინჯაოს. ესენია: ალუმინიანი ბრინჯაო, რკინა-მანგანუმიანი ბრინჯაო, რკინა-ტყვიანი ბრინჯაო და ა.შ. სპილენძის ღნობის გამოცდილებამ ადამიანი მიიყვანა რკინის გამოღობის საიდუმლოებასთან.

II ათასწლეულის დასაწყისში რკინას იღებდნენ მისი მადნიდან. ძველი წელთაღრიცხვის XVIII საუკუნიდან მეორე ათასწლეულის ბოლო ხანამდე ხეთურ-სუბარულ ტომებს ეკავათ ტერიტორია მესოპოტამიიდან კავკასიონამდე. ამ ტომებში შედიოდნენ ზემოთ ნახსენები მუსკები და, აგრეთვე, ერთ-ერთი ძირითადი ტომი „ხალდი“, რომლის სინონიმური სახელია „ხალიბი“. ხალიბთა ტომები ნაზიარები იყვნენ რკინის მიღების საიდუმლოებას. ამას ადასტურებს მრავალი არქეოლოგიური ძეგლი და ფოლადის ბერძნული სახელწოდება „ხალუფს“. დღეისათვის ცნობილია დასავლეთ საქართველოში გათხრებით მოძიებული ძვ.წ. აღრიცხვის XVIII საუკუნის რკინის სახელოსნოები „მშვიდობაური II“, „ნაგომარი 1/2“, წინაანტიკური პერიოდის რკინის სადნობი სახელოსნოები ჯიხანჯურში, ლაითურში, ანასეულში და სხვაგან. სულ 400 ობიექტი. უხვადაა აგრეთვე რკინის ძველი სახელოსნოები აღმოსავლეთ საქართველოში, კერძოდ, ქვემო ბოლნისში და მის მიმდებარე ტერიტორიებზე, პანკისის ხეობაში, კასპის მიდამოებში, მანგლისის სანახებში.

უძველეს დროში რკინა ოქროზე უფრო ძვირად ყვასობდა. ცნობილია, რომ ძველი წელთაღრიცხვის მე-2 ათასწლეულში ეგვიპტის ფარაონმა თხოვნით მიმართა ხეთების მეფეს - ოქროს სანაცვლოდ მისთვის რკინა გაეგზავნა.

რკინის ხანის დასაწყისად ითვლება ძვ.წ.აღ. IX-VII საუკუნეები, როდესაც აზიისა და ევროპის მრავალ პირველყოფილ ტომში გავრცელდა საკუთარი რკინის წარმოება. ტერმინი „რკინის ხანა“ XIX საუკუნეში შემოიღო დანიელმა არქეოლოგმა კ. ი. ტომსონმა. იმ დროიდან რკინას იყენებენ სხვადასხვა დანიშნულების ნაკეთობათა დასამზადებლად და მან თანდათან დაიწყო ბრინჯაოს გამოძევება საბრძოლო თუ სამეურნეო იარაღების წარმოებიდან.

თავდაპირველად რკინა იწარმოებოდა უშუალოდ მისი მადნიბიდან ქვით ან თიხით ამოგებულ და ზოგან მიწაში ამოთხრილ ქურებში. აღდგენა ხდებოდა ხის ნახშირის საშუალებით. ნახშირის გასადვივებლად და საჭირო მაღალი ტემპერატურის მისაღებად ქურის ქვედა ნაწილში დატანებული ხერელიდან მიეწოდებოდა პაერი ბუნებრივი წვეით ან ტყავის საქშენებით. რკინის მიღების ამ ხერხმა მიიღო ცივბერვითი პროცესის სახელწოდება.

3 ათასი წლის მანძილზე რკინის მეტალურგიას არ განუცდია პრინციპული ცვლილება. ხდებოდა პროცესისა და ქურის კონსტრუქციის მხოლოდ თანდათანობითი სრულყოფა. ხელოვნური ბერვისთვის მძლავრი საბერველების გამოყენებას თან მოსყვა ქურის სიმაღლის გაზრდა, რაც ნაკარნახევი იყო მეტი ლითონის მიღების სურვილით. სამწუხაროდ, ასეთ ქურებში ჭედადი რკინის ნაკვლად მიიღეს ლითონი, რომელიც არ იჭედებოდა ანუ თუჯი (დღევანდელი გაგებით). მას თელიდნენ უვარგისად. ასეთ ლითონს (თუჯს) ასხამდნენ შოთების სახით, რომელთა სახელწოდებები სხვადასხვა ენაზე მიუთითებს მის უვარგისობაზე. რუსულად მას შეარქვეს „ჩუშკა“ ან „სვინკა“ ე.ი. ღორული რკინა. ინგლისურად კი „პიგ აირონ“, გერმანულად „შვეინეიზენ“ ან „ფერკელეიზენ“. მოგვიანებით შეამჩნიეს, რომ ქურაში თუჯის ჩატვირთვის შემდეგ მიიღება ჭედადი რკინა-ფოლადი. ასე აღმოცენდა რკინის წარმოების გუნდური პროცესი. ჩვენი წელთაღრიცხვის XII-XVII საუკუნეებში ეს ხერხი ფართოდ გავრცელდა ყველა ქვეყანაში, ხოლო XIV საუკუნეიდან ქურაში მიღებული თუჯიდან დაიწყეს დეტალების ჩამოსხმაც. პარადელურად დაიწყეს უფრო დიდი ქურების მშენებლობაც და ასე შეიქმნა პატარა ბრძმედები თუჯის სადნობად. გუნდური და ბრძმედის პროცესები გარკვეულ ხანს თანაარსებობდნენ. რკინის მიღების გუნდური პროცესები შემორჩა ძირითადად XVIII საუკუნემდე.

მეტალურგიის მასშტაბების განვითარებამ გაზარდა მოთხოვნილება ხის ნახშირზე. ამან გამოიწვია ტყის მასივების გაძლიერებული განეხა. ხე-ტყის მასალა ამავე დროს ხაჭირი იყო გკმთმშენებლობის, საბინაო მშენებლობისა და სხვა დარგებისთვისაც. XVII საუკუნის დასაწყისისთვის დაიწყეს სამუშაოები ბრძმედის ღუმელში აღმდგენლად ქვანახშირის გამოყენებისათვის. ამ საკითხში გარკვეულ წარმატებას მიაღწია ლორდ ედუარდ დადლის უკანონო შვილმა დად დადლიმ. მან კოლექჯის დამთავრების შემდეგ მამისგან მიიღო სამართავად სამი მეტალურგიული ქარხანა, მაგრამ პოლიტიკურ ვითარებათა შეცვლის გამო მისი პატენტი გააუქმეს, ხოლო კონკურენტებმა ქარხნები დაუნგრიეს. შემდგომში მან ახალი მეფის დაეალებით დაიწყო ზარბაზნების ჩამოსხმა, მაგრამ ისევ შეეწირა პოლიტიკას და ტყვეობაშიც კი მოხვდა. იგი გარდაიცვალა 85 წლის ასაკში და თან გაიყოლა თავისი გამოგონების საიდუმლოება.

მეტალურგიაში ქვანახშირის გამოყენებაზე სხვებიც მუშაობდნენ და უკვე მაშინვე გამოითქვა აზრი ქვანახშირიდან გოგირდის მოშორების აუცილებლობის შესახებ. ამ მხრივ წარმატებას

მიადწია აბრახამ დერბიმ, რომელმაც მიიღო ქვანახშირიდან კოქსი და 1735 წელს მისი გამოყენებით ბრძმედში გამოადნო თუჯი. ეს, რაღა თქმა უნდა, დიდი მიღწევა იყო, მაგრამ მეტალურგების მიზანს აგრეთვე წარმოადგენდა ფოლადის წარმოებაში ხის ნახშირის შეცვლა სხვა სათბობით. 1766 წელს ინგლისელმა ძმებმა ტ. და დ. კრენიჯებმა ჭყადადი რკინის მისაღებად ალქმედ ღუმელში სათბობად გამოიყენეს ქვანახშირი. შემდგომში ეს ხერხი გააუმჯობესა პენრი კორტმა, რომელმაც 1784წ. კოქსი გამოიყენა სათბობად და დაამუშავა პუდლინგის ხერხი. ამ ხერხის სახელწოდება წარმოდგება ინგლისური სიტყვიდან „პუდლი“* – რაც ნიშნავს მორევას. ფოლადის მიღების პროცესში საჭირო იყო აბაზანის მორევა და ფოლადის წარმოქმნილი გუნდის დახვევა რკინის ძელაკზე ღუმელიდან მისი გამოღების მიზნით.

პუდლინგის ხერხის აღმოცენებასთან ერთად ინგლისში შეწყდა გუნდური ხერხის გამოყენება. მსოფლიოს სხვა ქვეყნებში კი გუნდური ხერხი და პუდლინგის ხერხი აგრძელებდნენ თანაარსებობას. ინგლისის მაგალითს მიბაძეს საფრანგეთსა და გერმანიაშიც. აშშ-ში იგი არსებობდა 1888 წლამდე, ხოლო ავსტრიასა და შვედეთში გუნდური ხერხი შემორჩა XX საუკუნის პირველ ათწლეულამდე.

ჩვენ მიერ განხილული ხერხებით ფოლადის მიღება ხდებოდა ცომისებრ მდგომარეობაში. მაგრამ ცნობილი იყო აგრეთვე თხევადი ფოლადის მიღების – ტიგელური (ქოთნური) ხერხი. იგი ფართოდ გამოიყენებოდა ცნობილი დამასკური ფოლადის მისაღებად სირიაში XII-XIII საუკუნეებში. შემდგომში იგი მიივიწყეს, მაგრამ აღადგინა ბ. გენტსმანმა ინგლისში 1740 წ.

XIX საუკუნის პირველ ნახევარში სწრაფი განვითარება დაიწყო მანქანათმშენებლობამ, გემთმშენებლობამ და სარკინიგზო ტრანსპორტმა. ამის გამო მკვეთრად გაიზარდა მოთხოვნა ფოლადზე. ფოლადის მიღების არსებული ხერხები ვერც რაოდენობით და ვერც ხარისხით ვეღარ აკმაყოფილებდა წამოჭრილ მოთხოვნებს. საჭირო იყო იაფი და მაღალხარისხოვანი თხევადი ფოლადის (სხმული ფოლადის) მიღება. ამ მიმართულებით დიდ წარმატებას მიადწია ინგლისელმა გამოგონებელმა პენრი ბესემერმა. მან ქალაქ შეფილდის ქარხანაში 1855 წელს დაამუშავა და გამოიყენა თხევადი ფოლადის მიღების ხერხი გამდნარ თუჯში ჰაერის შებერვის გზით, რასაც ბესემერის სახელი ეწოდა. ბესემერის პროცესი სწრაფად გავრცელდა მთელ მსოფლიოში, მაგრამ ამ

* რედაქტორისაგან: Puddle – ინგლისური ტრანსკრიფციით ოდნავ განსხვავებულად გამოითქმება.

ხერხს ნაკლი გააჩნდა – გოგირდისა და ფოსფორის მოშორების შეუძლებლობა, რამაც მძიმე მდგომარეობაში ჩააყენა ის ქვეყნები. სადაც მოიპოვებდნენ ფოსფორით მდიდარ რკინის მადნებს. შექმნილი მდგომარეობიდან გამოსავალი 1878 წ. იპოვა ინგლისელმა სიდნეი ჯილკრისტ ტომასმა. რომელმაც შეცვალა ბესემერის კონვერტერის მუავე ამონაგი ფუქე ამონაგით და დაამუშავა მაღალ-ფოსფორიანი თუჯების კონვერტერში გადაამუშავების ტექნოლოგია. მის პატივსაცემად ფოლადის დნობის ამ ხერხს ეწოდა თომასის პროცესი.

ინგლისელების პარალელურად თხევადი ფოლადის მიღების ხერხზე მუშაობენ გერმანიაში ძმები სიმენსები, ხოლო საფრანგეთში კი – მამა-შვილი ემილ და პიერ მარტენები. მარტენებმა გამოიყენეს სიმენსების მიერ შემუშავებული სითბოს რეგენერაციის პრინციპი და ხანგრძლივი (1840–1864 წწ.) მუშაობის შემდეგ შეძლეს ქარხანა „სირიელში“ ალქმედ ღუმელში ფოლადის მიღება თუჯისა და ჯართისაგან შედგენილი კაზმიდან. პროცესი ჩატარდა მუავე ამონაგიან ღუმელში, ხოლო თომასის აღმოჩენის შემდეგ დაიწყო ფუქეამონაგიანი მარტენის ღუმელების აგება. მარტენების აღმოჩენის შესახებ ერთი წლის შემდეგ გაიგეს ძმებმა სიმენსებმა. მათ ჯერ კიდევ 1861 წელს ჰქონდათ აღებული ინგლისური პატენტი რეგენერატორულ ალქმედ ღუმელზე. ამიტომ მთელ რიგ ქვეყნებში ამ პროცესს უწოდებენ „სიმენს-მარტენის“ პროცესს, ჩვენში კი – უბრალოდ „მარტენის პროცესს“.

XLX საუკუნის ბოლოს ნ. ბენარდოსმა და შემდეგ ნ. სლავიანოვმა ფოლადის შედუღებისთვის გამოიყენეს იმ დროისათვის უკვე კარგად ცნობილი ელექტრული რკალი. ამის საფუძველზე წარმოიქმნა აზრი, გამოეყენებინათ ელექტრული რკალი ფოლადის გამოსადნობად. რკალური ღუმელები ააგეს 1898–1901 წლებში საფრანგეთში პ. ერუმ და იტალიაში ე. სტასანომ. XX საუკუნის დასაწყისიდან დაიწყო რკალური ელექტროღუმელების გამოყენება ფოლადის სადნობად. კონვერტერის და მარტენის პროცესებისგან განსხვავებით (ისინი მარტო დაუანგვით ატმოსფეროში ტარდება), ელექტროსადნობ ღუმელებში შესაძლებელი იყო როგორც დამუანგველი, ისე აღმდგენელი ატმოსფეროს შექმნა. ამიტომ მათში შესაძლებელი გახდა სხვადასხვა თვისებების მქონე ძალზე მრავალფეროვანი მაღალხარისხოვანი ფოლადებისა და შენადნობების გამოდნობა. XX საუკუნის 50–60-იანი წლებიდან კოსმოსური, რაკეტული და ატომური ენერგეტიკის მოთხოვნილებათა დასაკმაყოფილებლად დაიწყო ვაკუუმური რკალური ღუმელების გამოყენება.

ამრიგად, XX საუკუნეში ერთმანეთის პარალელურად მუშაობდა ბესემერისა და თომასის კონვერტერები, მარტენის ღუმელები და მცირე მასშტაბით – ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელები. მეტალურგები ვერ ეგუებოდნენ კონვერტერული პროცესების გაუქმების აზრს. ეს ხერხები სუფთა ტექნოლოგიური პროცესებია და ტარდება სათბობის გამოყენების გარეშე, რასაც დიდი როლი ენიჭება მეტალურგიაში. მეტალურგთა მოელი პლედია მუშაობდა კონვერტერული პროცესების გაუმჯობესებაზე და ამ საკითხში ყველაზე დიდ წარმატებას მიაღწიეს ავსტრიელმა მეტალურგებმა. 1952 წ. „ფესტ-ალპინეს“ ფირმის „ლინცის“ და „დონავიცის“ ქარხნებში მათ დანერგეს კონვერტერული დნობის ახალი პროცესი – ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი. დნობის ამ ხერხს პირველად განმასორციელებელი ქარხნების სახელწოდებათა მიხედვით ეწოდა „ლდ-პროცესი“. ჟანგბად-კონვერტერული პროცესით მიღებული ფოლადი თავისი ხარისხით კონკურენციას უწევდა მარტენის ღუმელში გამოდნობილს.

ტექნიკის განვითარებასთან ერთად გაიზარდა მოთხოვნები ძალზე მაღალხარისხოვან ფოლადზე. ასეთ ფოლადს ელექტრორკალურ ღუმელებშიც კი ვერ ადნობდნენ. სპეციალური ხარისხის ფოლადების მისაღები პროცესების ძიებაში უკრაინის ე. პატონის სახელობის შედუღების ინსტიტუტის თანამშრომლებმა 1952–53 წლებში შეიმუშავეს ფოლადის დნობის ახალი ხერხი – ელექტროწიდური დნობა (ეწდ).

ელექტროწიდური დნობა ტარდება ელექტროწიდურ ღუმელში. გადასამუშავებელი ლითონის ზოდის (სახარჯი ელექტროდი) გადადნობა ტარდება იმ სითბოს ხარჯზე, რომელიც გამოიყოფა ელექტროგამტარ სინთეზურ წიდაში ელექტროდენის გაგლის შედეგად. ელექტროწიდური დნობის შედეგად მიიღება სუფთა და მაღალი ხარისხის ლითონი.

მაღალხარისხოვანი ლითონების გამოსადნობად, რომელთა მიღებაც შეუძლებელი იყო ვაკუუმურ-რკალურ და ინდუქციურ ღუმელებში, XX საუკუნის 50–60-იან წლებში შემუშავებულ იქნა ელექტრონულ-სხივური დნობა (ესდ). დნობა ტარდება ღრმა ვაკუუმში. ელექტრონული ზარბაზნიდან ამოტყორცნილი ელექტრონების გამოსადნობ ლითონთან შეჯახებისას, ელექტრონების ენერგია გარდაიქმნება სითბურ ენერგიად, რაც იწვევს ლითონის გადნობას*. ამ ხერხით მიღებული ფოლადები გამოირჩევა ძალზე მაღალი ხარისხით.

* რედაქტორისაგან: ამ ხერხით შესაძლებელია არა მარტო ლითონების, არამედ მათზე უფრო ძნელად გასადნობი ჟანგეულების გადნობა და აორთქლება.

XX საუკუნის 50-იან წლებში განვითარება დაიწყო პლაზმურმა მეტალურგიამ. იგი გამოიყენება როგორც მადნიდან ლითონების მისაღებად, ისე ფოლადის გამოსადნობად. დნობა ტარდება პლაზმურ რეაქტორში ან პლაზმურ ღუმელში. ფოლადის გამოსადნობად გამოიყენება პლაზმურ-რკალური ღუმელი (პრლ). დნობა მიმდინარეობს ინერტულ ატმოსფეროში. პლაზმის წარმოქმნელ აირად გამოიყენება არგონი ან აზოტი. პლაზმურ-რკალური გახურების გამოყენება შეიძლება ინდუქციურ ღუმელშიც, რაც აჩქარებს ლითონის დნობას. პლაზმური დნობით მიღებული ლითონი ძალზე სუფთა და მაღალხარისხოვანია.

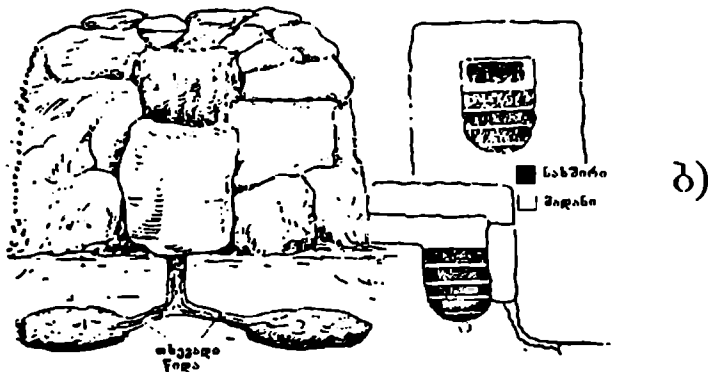
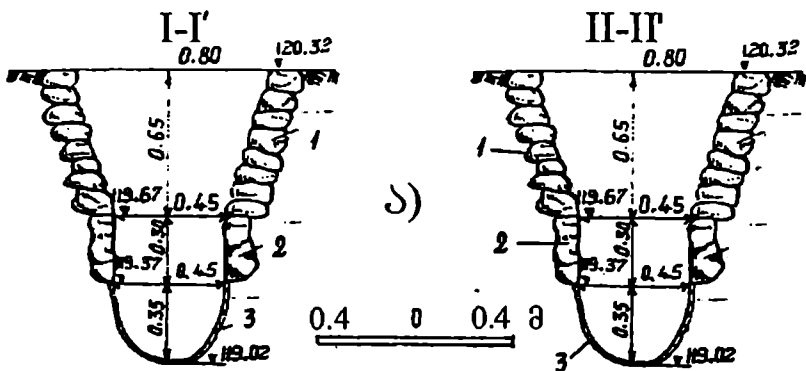
1.2.2. რკინის წარმოება ძველ საქართველოში

ძველ საქართველოში რკინის მიღება წარმოებდა პრიმიტიულ ქურებში და რკინის მიღების ამ ხერხს ეწოდება ცივბერვითი პროცესი.

დასავლეთ საქართველოში ჯიხანჯურისა და ცეცხლაურის მახლობლად ნაპოვნია რკინის მისაღები ქურა-ორმოები. მიწის ზედა ქურები ნაპოვნია ბოლნისის სიონიდან ჩრდილოეთით 2 კმ დაშორებით, რომლებიც მიეკუთვნება გვიანი ბრინჯაოს ხანას (სურ.1.1). რკინის საწური ასეთი ქურები დიდი რაოდენობითაა ნაპოვნი აღმოსავლეთ და დასავლეთ საქართველოს ბევრ ადგილას. „ბოლნური ქურა“ ნაგებია ქვით. შიგნიდან ამოგოზილია ცეცხლგამძლე აყალო მრწით. მისი კედლები დაფარულია ოდესღაც დაწურული რკინის – „პერისა“ და „წიდის“ შეყინული მასით. წინა მხრიდან აფარებულ ქვას – „კარებს“ პროცესის დამთავრების შემდეგ მოხსნიდნენ, გამოუშვებდნენ თხევად წიდას და გამოქონდათ ლითონის გუნდა.

ცივბერვით ქურაში ხდება რკინის მადნის აღდგენა ხის ნახშირით. აკადემიკოს ა. ბაიკოვის თანახმად, ნორმალური სინესტის ჰაერით ხის ნახშირის წვის თეორიული ტემპერატურა არ აღემატება 1400 °C. სითბოს დანაკარგების გათვალისწინებით (ჰაერის ტენის დისოციაციასა და ქურის კედლების გახურებაზე) პროცესის ტემპერატურა არ აღემატება 1300-1350 °C. ქურის სიმაღლე იყო არა უმეტეს 1 მ-ისა და ამიტომ ქურიდან გამომავალი აირების ტემპერატურა არ იყო მაღალი. ქურის უმეტეს ნაწილში ტემპერატურა, სავარაუდოდ, არ უნდა ყოფილიყო 1100 °C მეტი.

ქურის ფსკერზე ჩატვირთულ ხის ნახშირს ან შეშას აღვივებდნენ, შემდეგ კი ფენა-ფენად ტვირთავდნენ ხის ნახშირსა და



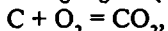
სურ. 1.1 ქართული ცივებრვის ქურები

ა) ქურა-ორმოები (ჯიხანჯურიდან)

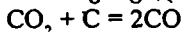
ბ) რკინის საწური მიწისზედა ქურა „სორჯუ“ (ბოლნისიდან)

1 - ქვის ამონაგა; 2 - ქვის ფილები; 3 - ქურის თიხის ამონაღესი

რკინის მადანს. ნახშირის წვისათვის საჭირო ჰაერი ქურის ქვემოთ დატანებული ხერელიდან მიეწოდებოდა ბუნებრივი წევით. შემდგომში კი მისი შებერვა ტყავის საბერველით დაიწვეს. ნახშირის წვის შედეგად წარმოიქმნებოდა ნახშირორჟანგი

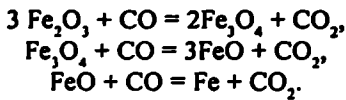


რომელიც შემდეგ, საქმენიდან მოშორებით, ხის ნახშირთან შეხებისას გარდაიქმნებოდა ნახშირჟანგად



ეს აირი ბუნებით აღმდგენელია.

შემოთქენ მოძრაობისას ნახშირჟანგი ეხებოდა: მადნის ნატურებს და აღადგენდა რკინას.



კაშიმი თანდათან დაბლა ეშვებოდა, ამიტომ ზემოდან ამტებდნენ ფენა-ფენად ახალ-ახალ კერძებს. ქურაში ტემპერატურა არ იყო საკმარისი რკინის გასადნობად. რკინა დნება 1539 °C ტემპერატურაზე. ქურის ქვედა ნაწილში კი ტემპერატურა არ აღემატებოდა 1350 °C. ამიტომ ქურის ფსკერზე გროვდებოდა გარბილკბული რკინის მარცვლები. ვინაიდან რკინის მადანი დიდი რაოდენობით შეიცავს კაჟიწასა და სხვა ფუჭ ჟანგულებს, წარმოიქმნებოდა თხევადი წიდა. საქართველოში ნაპოვნი წიდის დნობის ტემპერატურა მერყეობს 1200-1280 °C ფარგლებში, ხოლო თიხის ამონაღვსისა შეადგენს 1450 °C. ასეთი ამონაგი კარგად უძლებდა წარმოქმნილ თხევად წიდას. პროცესის დასასრულს წინა მხარეს გამოტეხავდნენ, გამოუშვებდნენ თხევად სილიკატურ წიდას და მარწუხებით გამოიღებდნენ რკინის გუნდას (კვერს). ეს გუნდა დიდი რაოდენობით შეიცავს წიდისა და გაუხარჯავი ხის ნახშირის ნაწილაკებს. ნაკეთობის დასამზადებლად ვარგისი რკინის მისაღებად გუნდას ბეგვავდნენ უროებით ქვის გრდემლზე. ამ დროს ადვილად სცილდებოდა წიდის ნაწილაკები და ნახშირი, რის შედეგადაც მიიღებოდა რკინის მკერივი კვერი. ამ ხერხს ახლავს რკინის დიდი დანაკარგები. ცხრილში 1.4 მოყვანილია ზემო სვანეთიდან წამოღებული რკინის მადნის და წიდების ქიმიური ანალიზის მონაცემები. ცხრილიდან ჩანს, რომ ესაა მართლაც ცივბერვითი პროცესის რკინით მდიდარი წიდები. ცივბერვით ქურაში მიიღებოდა როგორც რკინა, ისე – ფოლადი.

დროთა განმავლობაში ხდებოდა რკინის მიღების ხერხის სრულყოფა. გამოიყენეს მძლავრი საბერველები, გაზარდეს ქურის სიმაღლე და გადავიდნენ რკინის მიღების ორსაფეხურიან მეთოდზე.

პ. კვირიჩი თვლის, რომ პირველად ამიერკავკასიაში უნდა მიეყვლიათ ხის ნახშირზე რკინის ხელმეორედ გახურების გზით ფოლადის მიღების ხერხისათვის, საიდანაც იგი გავრცელდა მეზობელ კუთხეებშიც.

რკინის წარმოების პროცესი თანდათან კოლექტიური ხდებოდა და მასში მონაწილეობდნენ სხვადასხვა სპეციალისტები.

სამთოელებს და უშუალო მწარმოებლებს „რკინის კაცებს“ უწოდებდნენ. შესასრულებელი სამუშაოს მიხედვით ისინი რამდენიმე ჯგუფად იყვნენ დაყოფილნი. მაძიებლები რკინის მადნეულის საძიებო საქმეს აწარმოებდნენ. ამომცნობნი ამოწმებდნენ მიკელეული საბადოს მადნეულის ხარისხს. მადნეული მთხრელებს

ზემო სენეოთიდან წამოდებული რკინის მადნისა და წილების ქიმიური ანალიზის შედეგები (1956 წელი)
 (ცხრილი 1.4)

№	ნიმუშების დასახელება	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe	FeO+Fe ₂ O ₃	P	S	C	Mn	P ₂ O ₅	SO ₃
1	წიდა-1-1	66,61	1,5	2,53	-	8,38	2,73+9,3	0,01	0,01	-	0,13		
2	წიდა-1-2	21,74	4,2	2,17	-	48,7	49,3+14,5	0,17	0,020	0,57	0,21		
3	წიდა-1-3	74,9	2,25	1,54	-	7,8	0,72+10,5	0,018	0,02	-	0,11		
4	წიდა-1-4	15,7	0,95	0,7	-	57,12	-*	0,013	0,019	0,3	0,13		
5	წიდა (მდიდარი) 1-5	9,56	2,7	2,17	-	67,08	75,0+12,60	0,036	0,023	0,12	0,19		
6	(?) 1-6	70,8	0,90	0,7	12,95	5,04	-	0,12	0,018	0,18		5,48	1,12
7	წიდა-მადანი. შხიბარიდან. II-2	29,22	4,5	3,0	10,13	40,1	46,96+5,22	0,18	0,015	0,09	0,24		
8	წიდა. იფარიდან III-1	26,6	5,4	2,9	8,2	38,10	31,96+19,0	0,35	0,034	0,25	0,27		

* Fe+FeO = 63,16

Fe₂O₃ = 11,57

ამოქონდათ საბადოდან, ხოლო მზიდველებს გადაქონდათ დანიშნულ ადგილზე. მკაზმეებს ევალებოდათ მადნის კაზმვა და მისი შემსაღება „დასაწურად“. მწურავები ნაკაში რკინის მადანს ჩაარეგებდნენ „ბოვიში“. მბერავები საბერველით უზრუნველყოფდნენ ქაერის უწყებტ მოწოდებას. მეუროენი დაწურული რკინის ლუგეს ბეგევენდნენ გრდემლსე. მენახშირენი ემსახურებოდნენ ნახშირის დაწვა-დამზადებას. მკედლები ანუ „კვერით ხურონი“ ამზადებდნენ რკინის სხვადასხვა ხელადს (ნაკეთობას). გამსაღებელნი კი ემსახურებოდნენ სავაჭრო საქმიანობას.

რკინის მისაღებად გამოიყენებოდა სხვადასხვა დასახელების აგრეგატები. განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს „სახმილი“ და „ბოვი“. სულხან-საბა ორბელიანის განმარტებით, სახმილი აღნიშნავს მადნის გამოსაშრობს, ხოლო ბოვი – ლითონის პირველად გამოსადნობელს.

წარმოების ორსაფეხურიან ხერხზე, ე. ი. გუნდურ პროცესზე გადასვლასთან დაკავშირებით კიდევ უფრო დაიხვეწა რკინის მიღების კულტურა. მეტი ყურადღება ექცეოდა მადნის მომზადებას დნობისათვის. ხლებოდა მისი გამდიდრება დაფუშენით, გაცხავებით, წყალში გარეცხვით ფუჭი ქანების მოსაშორებლად. ასე მომზადებულ მადანს შემდეგ ახურებდნენ ტენის მოსაშორებლად. დნობისათვის მომზადებულ მადანს კაზმავდნენ, საჭიროების მიხედვით ურთავენდნენ სხვადასხვა დანამატს – კაუმიწას, რკინაწიდას, მანგანუმის მადანს და აღნობდნენ თანამიმდევრობით ჯერ საწურ, შემდეგ კი – სადულარ ქულბაქებში. იქედან გამოღებულ კვერს დაამუშავებდნენ საჭედურ ქურაში და შემდეგ გამოჭედავენდნენ ნაკეთობას (ხელადს). ეს ფაქტიურად წარმოადგენს ცივბერვითი ხერხიდან გუნდურ ხერხზე გადასვლას.

საქართველო, წინაანტიკური პერიოდიდან მოყოლებული, ყოველთვის აწარმოებდა ლითონს როგორც საკუთარი საჭიროებისათვის, ისე ქვეყნის გარეთ გასატანად, მაგრამ გამუდმებით იყო ჩართული თაყდაცვით ომებში. მტრები აოხრებდნენ ქვეყანას. ამ დროს კი ხშირად ნადგურდებოდა მეღითონეობის კერები და იღუპებოდნენ თვით ამ საქმის მცოდნენიც. ბევრი საიდუმლო დაიკარგა და საქართველოს მეტალურგია დაცემის პირამდე მივიდა. XVIII საუკუნეში ერეკლე მეორემ, ითვალისწინებდა რა ქვეყნისათვის მეტალურგიის საჭიროებას, გადაწყვიტა მისი აღორძინება. ამისათვის მოიწვია ქართველ ტომთა შთამომავლები გუმიშხანედან (ოსმალეთიდან), რითაც აღორძინა ახტალა-ალავერდის ქარხნები და ჩათახის მეტალურგია.

XIX საუკუნეში, საქართველოს სხვადასხვა კუთხეში ცალკეული სახელოსნოები მრავლად იყო შემორჩენილი. ამ სახელოს-

ნოებში აწარმოებდნენ საკმაოდ მაღალი ხარისხისა და დიდი მკვეთელობის მქონე ფოლადს.

12.3. რკინის ცივბერვითი ხერხით მიღება სხვა ქვეყნებში

რკინის ცივბერვითი მიღების ხერხი ფართოდ გამოიყენებოდა სხვა ქვეყნებშიც. რუსეთის სამხრეთ ნაწილში და აღმოსავლეთ ევროპის ტყიან ზოლში რკინის წარმოების დაწყება თარიღდება ძვ.წ.ად. VIII-VII საუკუნეებით. არსებობს ასრი, რომ ძველმა სლავებმა გვერდი აუარეს ბრინჯაოს ხანას (რუსეთის დაბლობში არ მოიპოვება სპილენძის მადნები, სამაგიეროდ უხვადაა მდიდარი რკინის მადნები) და მათ პირდაპირ რკინის წარმოებით დაიწყეს მეტალურგია. ასევე შეიძლება ითქვას, რომ საქარის უდაბნოს სამხრეთით ჩატარებული არქეოლოგიური გათხრებით დასტურდება პირველყოფილი ადამიანების ქვის ხანიდან უშუალოდ რკინის ხანაში გადასვლა.



საქართველოს მსგავსად პირველი ცივბერვითი ქურები იქაც კეთდებოდა მიწის ორმოებში. ამისთვის ძირითადად იყენებდნენ მთის ფერდობებს. ამით ხსნიან ქურის რუსულ სახელწოდებასაც „გორნ“, რაც უკავშირდება მთის რუსულ სახელწოდებას „გორა“. ასეთი უმარტივესი ცივბერვითი ქურა ნაპოვნია რუსეთის ტყიან ზოლში (სურ. 1.2). შემდეგ დაიწყო მიწის ზედა ქურების მშენებლობაც. მცირე წარმადობისა და არაეკონომიურობის გამო ცივბერვითი პროცესი რუსეთში გამოიყენებოდა ა.წ.ად. XII-XIII საუკუნეებამდე.

სურ. 1.2. უმარტივესი ცივბერვის ქურა მთის ფერდობზე

(სურ. 1.3). ქურის წინა ნაწილში დატანებული იყო ხერელი შეშით ღუმელის გასახურებლად, თხევადი წილის გამოსაშვებად, ჰაერის შესაბერად და რკინის მზა გუნდის გამოსაღებად (სურ. 1.4, 1.5



სურ. 13. იაკუტიური ცივბერვის ქურა

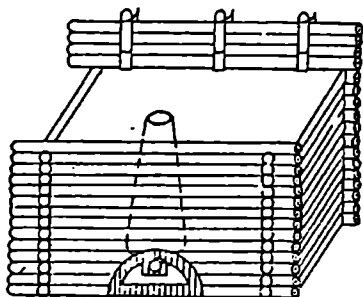
და 1.6). ასეთი ცივბერვის ქურა იაკუტიაში შემორჩა XX საუკუნის დასაწყისისათვის.

რუსეთში ძვ.წ.ად. VIII საუკუნეში გალიჩის ტბასთან რკინის აღდგენა ხდებოდა ფართოყელიან თიხის ქოთანში (ტიგელში). ქოთანში ფენებად ტვირთავდნენ გამდიდრებულ მადანს და ხის ნახშირს. საესე ქოთანს დგამდნენ კოცონში.

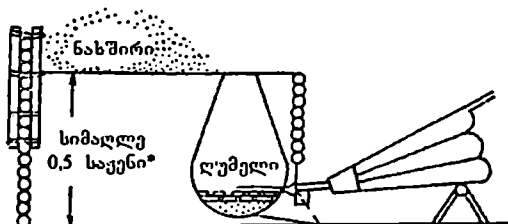
რკინის აღდგენის შემდეგ წიდას გადმოღვრიდნენ ქოთნიდან და ამოიღებდნენ რკინის გუნდას. ასეთი ქურიდან ამოღებული წიდას ქიმიური ანალიზით და-



სურ. 1.6. იაკუტიაში მდ. ვილიუას ნაპირთან 1928 წ. აღმოჩენილი ცივბერვის ქურა



სურ. 14. ცივბერვის ქურის ესკიზი



სურ. 15. ცივბერვის ქურის ვერტიკალური კრილი

დგინდა მისი შედგენილობა: 18,7 % SiO_2 ; 56,56 % FeO ; 13,79 % Fe_2O_3 ; 3,2 % Al_2O_3 ; 0,1 % MnO ; 3,5 % CaO ; 0,64 % P_2O_5 ; $\text{Fe}_{\text{საერთო}} = 56,33$ %. როგორც ვხედავთ, ეს წიდა ტიპური მაღალრკინიანი ცივბერვითი წიდაა.

ძველი რუსული მიწის-ზედა ცივბერვის ქურა (სურ. 1.7) დამზადებულია თიხისგან. ასევე თიხისგანაა აგე-

* რედაქტორისაგან: საენი არის სიგრძის საზომი ძველი რუსული ერთეული. 1 საენი=2,1336 მ.

ბული ბელორუსული ცივბერვის ქურა, რომელიც ნაპოვნია ლებედინსკის და კიმიას ნაქალაქარზე (სურ. 1.8). ცივბერვის ქურები ნაპოვნია აგრეთვე უკრაინაში რაიკოვეცკისა და გონჩევსკის ნაქალაქართა გათხრის შედეგად.

ინდოეთში, ძველ დროში, რკინა მიიღებოდა დაბალ ქურებში. მიღებულ რკინას უწოდებდნენ ვუცს, რაც პურს ნიშნავს ინდურ ენაზე.

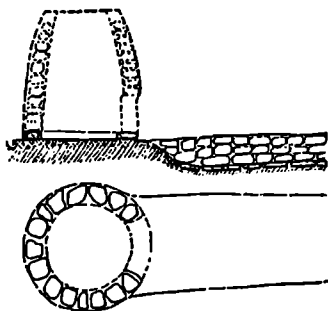
კუნძულ ბორნეოზე რკინას ღებულობდნენ 90 სმ სიმაღლის ცივბერვით ქურებში.

ცენტრალურ აფრიკაში და მადაგასკარზე აგებდნენ თიხის ღუმელებს 3 მ სიმაღლით და 0,9 მ დიამეტრით. ღუმელის ქვედა ნაწილს ჰქონდა 7 ხერელი და თითოეულში ჩადგმული იყო თიხის სამი მილი ჰაერის შესაბერად. სხვათა შორის, XX ს. 70-იან

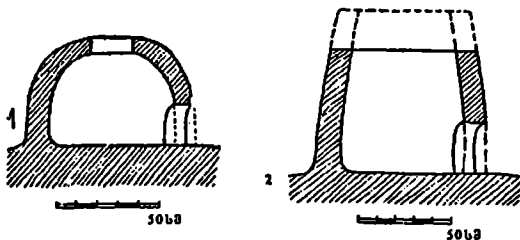
წლებში რუსმა ჟურნალისტებმა მოინახულეს ის ადგილები და მათი თხოვნით იქაურებმა სახელდახელოდ ააგეს ცივბერვის ქურა და გამოადნეს რკინა. მაგრამ ისიც უთხრეს ჟურნალისტებს, რომ ამ ხერხით აღარ იღებენ რკინას. ვინაიდან უყურო იაყი და ხარისხიანი რკინა იყიდება ბაზარზე.

ჩრდილოეთ ამერიკაში ნიუ-იორკის და ნიუ-ჯერსის მეტალურგიაში XIX საუკუნის ბოლომდე იყო შემორჩენილი რკინის მიღება ქურებში.

დასავლეთ ევროპაში 1293 წლიდან ძალზე გავრცელდა ესპანეთში, კატალონიაში დამუშავებული რკინის პირდაპირი მიღების ხერხი ცივბერვით ქურაში. კატალონიური ქურა საგრძნობლად განსხვავდება სხვა ქვეყნებში გავრცელებულ ცივბერვის ქურებისაგან (სურ. 1.9). ქურის კედლები მზადდებოდა თუჯის ფილების ან რკინის ძელაკებისაგან. ლორფინი



სურ. 1.7. ძველი რუსული ცივბერვის ქურა

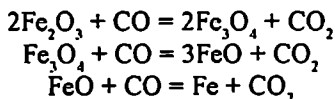


სურ. 1.8. ძველი ბელორუსული ცივბერვის ქურა: 1 - ლებედინსკის ნაქალაქარი; 2 - კიმიას ნაქალაქარი



სურ. 1.9. კატალონიური ცივბერვის ქურა

(ფსკერი) დამზადებული იყო ცეცხლგამძლე ფილისაგან. ქურა მოთავსებული იყო აგურის გარსაცმში. ქურა ზემოთკენ ფართოდებოდა. საქშენისა და მასთან მიმდებარე ორი კედელი ვერტიკალური იყო, ხოლო საქშენის კედლის მოპირდაპირე მხარე – დახრილი ან მომრგვალებული. ქურის განივიკვეთი უმეტესწილად იყო 500X500 მმ, ხოლო სიღრმე – 400 მმ. საქშენი კედელში ჩადგმული იყო 40°-იანი დახრით და შეწეული იყო შიგნით 15–20 სმ-ით. შებერვა ტარდებოდა ერთსაბერველიანი ტყავებით ან სპეციალური წყლის დოლით (ტრომბით). დნობა შემდეგნაირად ტარდებოდა: ქურაში ყრიდნენ ხის ნახშირს და ამჭიდროებდნენ ხის უროების დარტყმით საქშენის დონემდე. შემდეგ ჩადგამდნენ რკინის ფურცელს საქშენის კედლის პარალელურად მისგან ქურის სიგანის 2/3 მანძილის დაშორებით. რკინის ფურცელსა და საქშენის კედელს შორის სივრცეს ავსებდნენ ხის ნახშირით და ამჭიდროებდნენ ხის უროებით (საბეგვლებით). ფურცლის მეორე მხარეს ყრიდნენ დამსხვრეულ რკინის მადანს და მასაც ამჭიდროებდნენ. ქურის ავსების შემდეგ რკინის ფურცელი ამოქონდათ. ანთებდნენ ნახშირს და იწყებდნენ შებერვას. შებერვისას წნევა თავიდან იყო 25 მმ Hg*, შემდეგ კი – ნახშირის წვის გაძლიერებასთან ერთად, ზრდიდნენ 75 მმ Hg-მდე. ნახშირში ჰაერის გავლისას წარმოიქმნებოდა ნახშირჟანგი, რომელიც ახდენდა პირველად აღდგენას.



გახურებული და აღდგენილი რკინის მადანი და რკინა ემე-ბოდა ლორფინისაკენ, სადაც გრძელდებოდა მისი აღდგენა ხის ნახშირის მყარი ნახშირბადით $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$. კაზმის დაწვეასთან ერთად ავსებდნენ ქურას მასალებით ზემოაღნიშნული ხერხის მიხედვით. წიდას დროდადრო გამოუშვებდნენ ხოლმე ქურის კედელში დატანებული სპეციალური საწიდე ფანჯრიდან. ქურის ძირში (ლორფინზე) გროვდებოდა აღდგენილი რკინის მარცვლები. მუშები მათ რკინის ძალაყინით აგროვებდნენ ერთი გუნდის სახით. როცა გუნდა გაიზრდებოდა, მას გამოიღებდნენ ქურიდან, რის შემდეგაც ბეგვაევენ წიდის ნაწილაკების გამოსადგენად და სიმკვრივის გასაზრდელად. დნობა გრძელდებოდა 6–7 საათი. ერთ ოპერაციაზე ქურიდან გამოჰქონდათ 120–160 კგ მასის გუნდა.

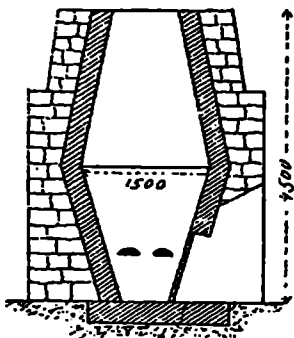
* რედაქტორისაგან: წნევის განზომილების ქართული თანამედროვე აღნიშვნაა „მმ Hg“, ნაცვლად აღრინდელისა „მმ.ვცხ.წყ.სვ.“.

160 კგ რკინის მისაღებად იხარჯებოდა 460 კგ რკინის მადანი და 500 კგ ხის ნახშირი.

კატალონური ქურების გამოყენება ევროპაში გაუქმდა XIX საუკუნის დასაწყისში.

ცენტრალურ აფრიკაში და მადაგასკარზე გამოყენებული ქურა, რომლის სიმაღლეც იყო 3 მ. ფაქტიურად წარმოადგენდა შახტურ ღუმელზე გადასვლას. დაბალი შახტური ღუმელები გვხვდებოდა რომის იმპერიის ზოგიერთ კოლონიაში. ასეთ დაბალ შახტურ ღუმელებს, სადაც ხდებოდა მადნიდან რკინის პირდაპირი მიღება, ეწოდებოდა შტუკოფენი (შახტური ცივბერვის ღუმელი). ფინეთში ასეთი ღუმელები მუშაობდა XIX საუკუნის ბოლომდე.

ძველი შტუკოფენების სიმაღლე იყო 4,5 მ, კვეთი კვადრატული ან იშვიათად მრგვალი (სურ. 1.10). პაერს აწვდიდნენ ხელის ან ფეხით მოქმედი ტყავის საბერველებით ერთი ან ორი საქშენით. საქშენი, მოთავსებული იყო ლორწინის ზემოთ 0,2–0,25 მ სიმაღლეზე. ნახშირს ჩატვირთვის შემდეგ აანთებდნენ და იწებდნენ შებერვას. შემდეგ კი ყრიდნენ ნახშირის და მადნის კერძებს. ღუმელში იგივე პროცესები მიმდინარეობდა, რაც ჩვეულებრივი ცივბერვის ქურებში. დნობას ატარებდნენ 16–24 კგ კვერის მიღებამდე. იგი გამოქონდათ ღუმელის ქვედა ნაწილში



სურ. 1.10 ფინური შტუკოფენი

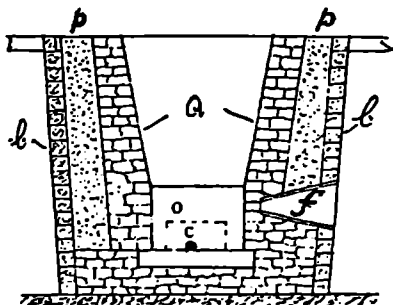
დატანებული ხერელიდან, რომელიც ღუმელის მუშაობის დროს ამოგებული იყო აგურებით. ამ პროცესით სხვადასხვა ადგილას მიღებული წიდეები შეიცავდა შემდეგ მინარევეებს: 19,40–34,94 % SiO_2 ; 2,96–19,63 % Al_2O_3 ; 1,51–2,6 % CaO ; 0,60–9,2 % MgO ; 39,38–48,86 % FeO ; 0,44–10,18 % Fe_2O_3 ; 2,9–2,81 % MnO ; 0,07–2,18 % P_2O_5 . როგორც ვხედავთ, ეს წიდეები სხვა ცივბერვითი პროცესების წიდეების ანალოგიურია და მდიდარია რკინის ჟანგულებით. მონაცემები ამ ღუმელებში მიღებული ლითონის შედგენილობაზე გამოყენებულ ლიტერატურაში არ არის მოყვანილი.

შტუკოფენები ფინეთის გარდა შეედეთშიც იყო გავრცელებული. მას უწოდებდნენ ოსმუნდის ღუმელებს, ხოლო მიღებულ კვერს – ოსმუნდს. ღუმელი ოთხკუთხაა და ფართოვდება ზემოთ (სურ. 1.11). პაერს უბერავდნენ f ფანჯრიდან. წიდა გამოდიოდა c ხერელიდან. გუნდა გამოქონდათ o ფანჯრიდან, რომელიც დნობის დროს ამოგებული იყო აგურით. ღუმელი ამოგებული იყო a

ცეცხლგამძლე ქვებით და გარედან პქონდა ხ გარსაცმი. სიერცეს გარსაცმსა და ამონაგს შორის აესებდნენ p მიწით.

რამდენიმე ადგილას შტუკოფენები მუშაობდა ბრძმედის ღუმლებთან ერთად. ბრძმედიდან მიღებულ თუჯს და შტუკოფენიდან მიღებულ რკინის ზოლებს ყიდდნენ.

მას შემდეგ რაც დნობამ შტუკოფენში მთლიანად დაუთმო a ადგილი დნობას ბრძმედში და თუჯის თხევად ფოლადად გადამუშავების ხერხებს, პერიოდულად შემოპქონდათ წინადადებები, ტარდებოდა ცდები და შენდებოდა სახელოსნოები მადნიდან რკინის პირდაპირი ხერხით მისაღებად. ასეთი იყო კლეის, რენტონის, შენის, იატესის, გულტეს, ნაზაროვის, ვესტმანის, სიმენსის, ფლერის, ტურანგინის და ხუსგაველის ხერხები და სხვა.



სურ. 1.11 შეედური შტუკოფენი
 a - ცეცხლგამძლე ქვები; b - გარსაცმი; c - საწიდე ხერხი; o - რკინის გამოსაღები ფანჯარა; p - მიწის ჩანაყარი

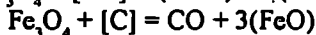
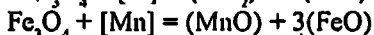
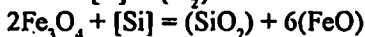
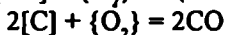
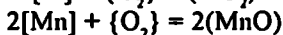
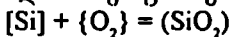
1.2.4. შენადული რკინის წარმოება გუნდური ხერხით

რკინისა და ფოლადის მიღების ხერხი თუჯიდან ნახშირბადის ამოწვისა და რაფინირების გზით ყველაზე უჩვეულებსია თუჯის გადამუშავების სხვა ხერხებს შორის. იგი ფართოდ გამოიყენებოდა XII-XVIII საუკუნეებში. სხვადასხვა ქვეყნებში გუნდური პროცესი ტარდებოდა სხვადასხვა ვარიანტით ერთი და იგივე პრინციპის - თუჯიდან ნახშირბადის ამოწვის შენარჩუნებით. ცნობილია გუნდური პროცესის შემდეგი ვარიანტები: 1) ნედლი ფოლადის მიღება, 2) რკინის მიღება ერთი დნობით, 3) მიყრით გადამუშავება, 4) ამოწვეით გადამუშავება.

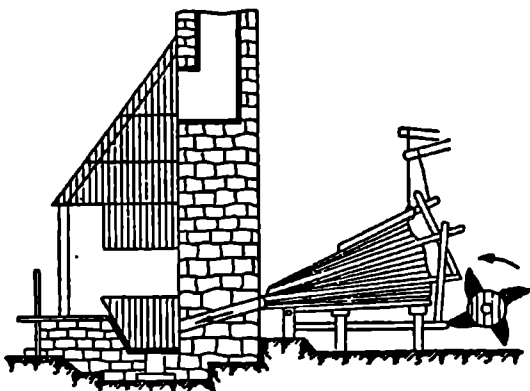
გუნდური პროცესისათვის იყენებდნენ სპეციალურ ქურას (სურ. 1.12).

გუნდური პროცესის არსი მდგომარეობს თუჯის მინარევების ამოწვაში ერთდროულად შენაბერი პაერის და ქურაში ჩატვირთული დამყანგავი წიდის საშუალებით. ქურაში ტვირთავენ ხის ნახშირს, აანთებენ და საქშენიდან უბერავენ პაერს. საქშენი მო-

თავსებულთა ქურის ზედა ნაწილში დახრილად. როცა ნახშირი გაღვივდება, ქურაში საქშენის ზემოთ ან მის ახლო მოთავსებულ თუჯს გაადნობენ. იმაედროულად ქურაში ამატებენ რკინის ჟანგეულებით მდიდარ წიდას. თუჯი თანდათანობით დნება და წიდასთან ერთად მიედინება ქვევით. რის შედეგადაც ხდება მისი დახალასება პაერის ჟანგბადით და წიდაში მყოფი რკინის ჟანგეულებით.



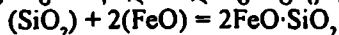
თუჯის დნობის ტემპერატურაა 1150–1200 °C, ხოლო დაბალნახშირბადიანი რკინისა – 1500 °C. ქურაში წვის ზონაში ტემპერატურა არ აღემატება 1300–1400 °C. ამიტომ ქურის ფსკერზე ილექება შესქელებული რკინა. ამ მასას ააგორებენ რკინის ძალაყინზე და ხელახლა ტვირთავენ ქურაში მეორადი დაჟანგვის მიზნით. ამის



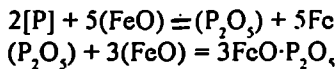
სურ. 1.12 გუნდური პროცესის ქურა (სქემატური ნახაზი)

შედეგად ქურის ფსკერზე ილექება მარცვლოვანი რკინის მასა. ეს მასა ამოაქვთ ქურიდან, ახურებენ, ამჭიდროებენ უროებით და აცლიან წიდის მინარევებს. შედეგად მიიღება რკინის მკერივი ნატერი.

გუნდურ პროცესში გამოყენებული ნახშირი სუფთა უნდა იყოს მინარევებისაგან, მცირე რაოდენობით უნდა შეიცავდეს ნაცარსა და გოგირდს. ამ პირობას ყველაზე უკეთ აკმაყოფილებს ფიჭვისაგან მიღებული ნახშირი. გარკვეულ მოთხოვნებს უნდა აკმაყოფილებდეს თუჯიც. არ არის სასურველი თუჯში სილიციუმისა და მანგანუმის მაღალი შემცველობა. სილიციუმი დნობის დროს უპირატესად იჟანგება და აფერხებს ნახშირბადის ამოწვას. ამასთან ერთად წარმოქმნილი კაუმიწა რეაქციაში შედის რკინის ქვეჟანგთან და ამცირებს წიდის დამჟანგავ უნარიანობას.



თუჯში მცირე რაოდენობით უნდა იყოს გოგირდი და ფოსფორი. დნობის დროს ლითონიდან გოგირდის ძალზე მცირე რაოდენობის მოშორებაა შესაძლებელი. რაც შეეხება ფოსფორს. იგი შორდება რკინის ქვეყანგის საშუალებით, მაგრამ არაუმეტეს 50-60 %-სა.



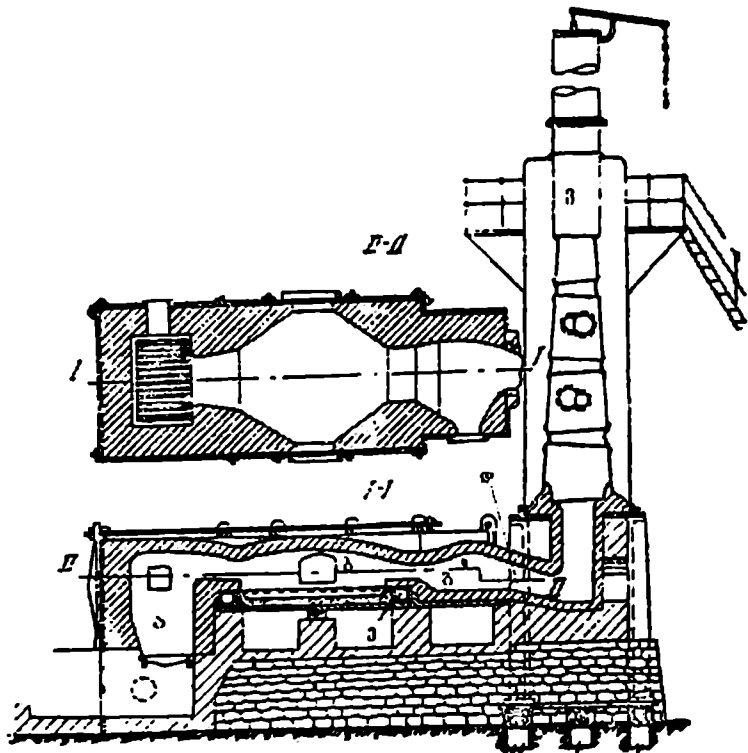
გუნდური პროცესის რკინა გამოირჩევა რკინის უანგეულების მაღალი შემცველობით: 72,2 % FeO; 1,2 % Fe₃O₄ და 7,52 % SiO₂. რაც შეეხება რკინის გუნდას, მისი შედგენილობა დაახლოებით შემდეგია: 0,03-0,05 % C; 0,01-0,02 % Si; 0,08 %-მდე Mn; 0,01-0,04 % P; 0,004-0,006 % S.

გუნდური პროცესის ნაკლს წარმოადგენს რკინის დიდი რაოდენობით (20 %) კარგვა, სათბობის დიდი ხარჯი და მცირე წარმადობა. მიუხედავად ამისა, იგი ღიდხანს გამოიყენებოდა შენადული რკინის კარგი თვისებების გამო.

1.2.5. შენადული რკინის წარმოება პუდლინგის ხერხით

გუნდური ხერხით რკინის წარმოებისათვის საჭირო იყო ხის ნახშირი. ამან გამოიწვია ტყის მასივების ძლიერი ჩეხა და მთელი რიგი ქვეყნები დადგა პრობლემის წინაშე: ან უნდა შექჩერებინათ ტყის გაჩეხა მეტალურგიული მიზნისათვის, ანდა უარი ეთქვათ ხე-ტყის მასალების სხვა დარგებში (გემთმშენებლობაში, საყოფაცხოვრებო საქმიანობაში) გამოყენებაზე. მიუხედავად იმისა, რომ XVII-XVIII საუკუნეების მიჯნაზე უკვე ცნობილი იყო ქვანახშირი და მისგან კოქსის მიღება, მათი გამოყენება გუნდურ პროცესში შეუძლებელი აღმოჩნდა. ორივე ეს მასალა დიდი რაოდენობით შეიცავს გოგირდს და რკინის მადანთან ურთიერთქმედებისას მიიღებოდა გოგირდით მდიდარი უხარისხო ლითონი. საჭირო იყო ისეთი სადნობი აგრეგატის შემუშავება, სადაც სათბობი და თუჯი არ შეეხებოდა ერთმანეთს. ასეთი აგრეგატი - პუდლინგის ღუმელი, შექმნა 1784 წ. პენრი კორტმა. ღუმელი შედგება სამი ნაწილისაგან (სურ. 1.13): 1) საწვავი განყოფილება, 2) სამუშაო სივრცე (სადნობი განყოფილება), 3) სათუჯე.

საწვავ სივრცეში ხდება კოქსის წვა. საწვავი სივრცე სადნობი განყოფილებისაგან გამოყოფილია ალის ზღურბლით. საწვავ სივრცეში სათბობის წვა ხდება ცეცხლრიკზე. წვის შედეგად წარმოქმნილი ალი გადადის სადნობ სივრცეში. სადნობი სივრცე-

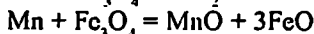
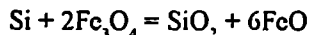


სურ. 1.13 პუდლინგის ღუმელი

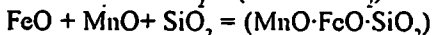
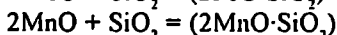
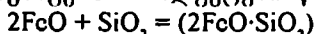
ა - საწვავი განყოფილება; ბ - სადნობი (სამუშაო) სივრცე;
 გ - სათუჯე; დ - ალიბჰე; ე - თუჯის დრუ კოლოფი; ე - საკვამლე მილი

დან ცხელი აირები გადადის სათუჯეში, სადაც მყარი თუჯი წინასწარ ხურდება დნობისათვის 20–30 წუთის განმავლობაში. სათუჯე ალიბჰეთია შეერთებული საკვამლე მილთან. სადნობ სივრცეში ხდება თუჯის გადნობა. სადნობი სივრცის ქვედი ადრე მზადდებოდა სილის დანატკეპნისაგან. შემდგომში ქვედის დასატკეპნად გამოიყენეს რკინის ხენჯის, რკინიანი წიდის და მკირეოლენი კვარცის ქვიშის ნარევი. ეს ნარევი დაიტკეპნებოდა მაღალ ტემპერატურაზე თხელი ფენებით საძირკველში ჩამაგრებული თუჯის ფილებზე. თუჯის ფილები გვერდებიდან შემოსასდურულია თუჯის დრუ კოლოფით, რომელიც ვივდება წელით. ღუმელის თალი კეთდებოდა დინასის აგურისაგან (96 % SiO_2). თალი ოდნავ დახრილია საკვამლე ზღურბლისაკენ. ეს ხელს უწყობდა

ცხელი აირების ნაკადის დაფენას ქვედ'სე და კასმზე სითბოს უკეთ გადაცემას. ღუმელის კედლებიც დინასის აგურებისგან მზადდებოდა. კედლის წინა მხარეს მოწყობილი იყო ორი ფანჯარა ღუმელში თუჯის ჩასატვირთად და მზა გუნდის გამოსაღებად. სამუშაო სიერცეში ტემპერატურა არ აღემატებოდა 1400–1450 °C. წინასწარ გახურებული თუჯი გადაქონდათ სადნობ სიერცეში. სადნობი სიერცის აირადი ფაზა დამჟანგველი ბუნებისაა. გარდა ამისა სამუშაო სიერცეში შექონდათ რკინის ხენჯი, რკინის მადანი ან რკინიანი წიდა. მაღალი ტემპერატურის წყალობით თუჯი დნება. გამდნარი თუჯის წვეთებზე მოქმედებს დამჟანგველი გარემო და დანაბატები.

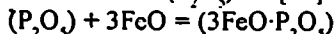
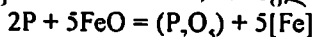


მინარეების დაჟანგვის პროდუქტები წარმოქმნიან წიდას.

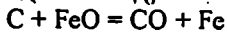


მანგანუმის ქვეანგი ამცირებს წიდის დნობის ტემპერატურას. ამიტომ მაღალმანგანუმიანი თუჯის გადამუშავებისას მიიღება ძალზე თხევადდენადი წიდა. ასეთი წიდა ღუმელის ატმოსფეროს დამჟანგველი მოქმედებისაგან იცავს ლითონს და ადვილად შორდება მას.

პუდლინგის პროცესში იჟანგება თუჯში არსებული ფოსფორის საერთო რაოდენობის 50–80 %, რომელიც გადადის წიდაში.



სილიციუმის და მანგანუმის მოშორების შემდეგ იწყება თუჯში მყოფი ნახშირბადის ამოწვა.



წარმოქმნილი ნახშირჟანგის ბუშტულები იწვევს ლითონის არევას, ზრდის წიდასთან მისი შეხების ფართობს და აჩქარებს ჟანგვით პროცესებს.

ნახშირბადის ამოწვასთან ერთად ლითონი უფრო ძნელდნობადი ხდება, სქელდება და ბოლოს კრისტალური მარცვლების სახით ცვივა ღუმელის ქვედზე. ამის შემდეგ იწყებენ რკინის მარცვლების აგორებას გუნდის სახით რკინის ძელაკზე. ზოგჯერ აგორების ნაცვლად ძელაკს ურტყამდნენ რკინის მარცვლებს მათი შეერთების მიზნით და შემდეგ გამოქონდათ ღუმელიდან რკინის გუნდა. ღუმელიდან გამოღებულ გუნდას მოჭიმავდნენ (ბეგავდნენ) გრდემლზე წიდის ნაწილების მოსაშორებლად.

შემდეგ გამოტყეადენენ ზოლს. ერთი დნობის ლითონი არაერთ-გვაროვანი შედგენილობისა იყო. მას ამტვრევდნენ და ახარისხებდნენ ტეხადობის მიხედვით, შეკრავდნენ ერთნაირ ლითონის პაკეტებად, ახურებდნენ შედუღებისათვის საჭირო ტემპერატურამდე და ჰედდნენ ან გლინაუდნენ. ასეთ რკინას ეწოდებოდა ერთხელშენადული რკინა. პუდლინგური რკინის თვისებებს აუმჯობესებდნენ ორჯერ და სამჯერ შენადული რკინის წარმოებით.

პუდლინგის ღუმელში მიიღებოდა სხვადასხვა სახის პროდუქცია: რბილი მცირენახშირბადიანი (0,15 %-მდე C) ლითონი, რომელსაც ეწოდებოდა ბოტკოვანი რკინა, შედარებით მაღალნახშირბადიანი ლითონი – პუდლინგური ფოლადი და წერილმარცვლოვანი რკინა.

შენადული რკინა გამოირჩევა გარკვეული დადებითი თვისებებით, რის გამო შენადული რკინის წარმოება პუდლინგის ხერხით XX საუკუნის შუა ხანებამდე შემორჩა ინგლისში, შვედეთში, აშშ-სა და საბჭოთა კავშირში.

1.2.6. შენადული რკინის წარმოება ასტონ-ბაიერსის ხერხით

შენადული რკინა გამოირჩევა განსაკუთრებული თვისებებით. საკაზმე მასალების სისუფთავის წყალობით იგი მცირე რაოდენობით შეიცავს გოგირდს. ფოსფორი აქტიურად იჟანგება პროცესის განმავლობაში. ამასთან ერთად, ლითონი მცირე რაოდენობით შეიცავს აირებს. შენადულ რკინაში დარჩენილი წილის ნაწილაკები, მართალია, აუარესებს ლითონის მექანიკურ თვისებებს, მაგრამ იმავედროულად იცავს ლითონს კოროზიისა და შინაგანი ბზარების განვითარებისაგან. გარდა ამისა, ეს ლითონი გამოირჩევა შედუღების მაღალი უნარით. ყველა ამ თვისების გამო შენადული რკინა ფართოდ გამოიყენებოდა ხიდების წყალქვეშა ნაწილისათვის საჭირო ფურცლების დასამზადებლად. შენადული მილებისათვის საჭირო შტრიპსების (ზოლების) მისაღებად. ორთქლის მანქანებისათვის, მომჭიმავე ჭანჭიკებისათვის და სხვ. შენადული რკინა თავისი მაღალი სისუფთავის წყალობით წარმოადგენს შეუდარებელ კაზმს მაღალხარისხოვანი ფოლადის გამოსადნობად ელექტროღუმელებში. ყველა ამ მიზეზთა გამო შენადულ რკინაზე მოთხოვნილება დიდი იყო, მაგრამ მის გამოყენებას ზღუდავდა პუდლინგური ლითონის სიძვირე და მცირე წარმადობა.

1930 წ. აშშ-ში ფირმა „ბაიერსმა“ ააგო ქარხანა ასტონის

ხერხით შენადული რკინის საწარმოებლად წლიური წარმადობით 25–50 ათასი ტ.

პროცესი სამსაფეხურიანია:

1. თხევადი თუჯის მიღება ბრძმედში ან ბოვში;
2. თუჯის გაქრევა ბესემერის კონვერტერში რბილი რკინის მიღებამდე;

3. კონვერტერული ფოლადის დამუშავება რკინის ჟანგეულებით მდიდარი წილით ციციხეში.

ბრძმედიდან გამოსული თუჯი გოგირდს დასაწეები რაოდენობით (0,03–0,04%) შეიცავს. ბოვიდან გამოშვებულ თუჯში კი გოგირდი მეტი რაოდენობითაა (0,06–0,08 %). ვინაიდან ბესემერის კონვერტერში გოგირდის მოწორება შეუძლებელია, ამიტომ ბოვიდან გამოშვებულ თუჯს უტარებდნენ დესულფურაციას სოდის დამატებით. ამ ოპერაციის წყალობით გოგირდის რაოდენობა თუჯში კლებულობდა 0,03–0,05 %-მდე.

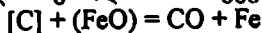
ბრძმედიდან ან ბოვიდან გამოშვებულ თუჯში საკმარ დიდი რაოდენობითაა სხვა მინარევეებიც: 4,0 % C; 1,5–2,5 % Si; 0,6–1,0 % Mn; 0,06–0,1 % P.

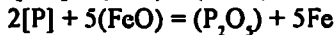
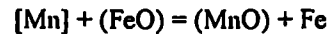
ბესემერის კონვერტერში გაქრევის შემდეგ მიიღება შემდეგი შედგენილობის ლითონი: 0,05–0,07 % C; 0,10–0,15 % Mn; 0,06–0,18 % P. სიცილიუმში მთლიანად ამოიწვება.

ბესემერის კონვერტერში მიღებულ 1630 °C ტემპერატურის მქონე ფოლადს საკმარ დიდი სიმაღლიდან ჩაასხამდნენ რკინის ჟანგეულებით მდიდარი წილით შეესებული ფიალაში. წილის სიმაღლე ფიალაში შეადგენდა 700–900 მმ, ტემპერატურა 1260–1300 °C. ხოლო მისი მოცულობა 6–8-ჯერ მეტი იყო ჩაასხმელი ლითონის მოცულობაზე.

რკინიან წიდას ადნობდნენ მერხვე მარტენის ლუმელში. წილის შედგენილობა იყო: 70–75 % FeO; 5–10 % Fe₂O₃; 2 % MnO; 2 % Al₂O₃; 10–12 % SiO₂; 2 % P₂O₅; 2 % (CaO + MgO). მის გამოსადნობად იყენებდნენ აგრეთვე დოლჟური ტიპის მბრუნავ ლუმელს, რომლის ფოლადის გარსაცმი ცივდებოდა წყლით. ლუმელს არ აქონდა ამონაგი და მუშაობდა გარნისაზე (ბროკელსბერგის ლუმელი).

კონვერტერიდან საწიდე ფიალაში გადასხმული ლითონი დიდი კინეტიკური ენერგიის წყალობით უმცირესი ზომის წვეთებამდე ამცირებდა წიდას და საწიდე ფიალაში მიიღებოდა წიდა-ლითონის ემულსია ძალზე გაზრდილი შეხების ფართობით, რაც ხელს უწყობდა რეაქციების სწრაფ განვითარებას. ამ დროს ძირითადად ხდებოდა ლითონში დარჩენილი მინარევეების ამოწვა.





საწიდე ფიალაში ამ რეაქციების განვითარებასთან ერთად გამოიყოფოდა კონვერტერში დნობისას და ფიალაში ჩასხმის დროს ლითონის მიერ შთანთქმული აირები. მინარეგებისაგან გასუფთავებული ლითონის დნობის ტემპერატურა ბევრად უფრო მეტია ფიალაში მყოფი წიდის ტემპერატურაზე. ხდება ლითონის დაკრისტალება და გუნდის სახით დალექვა ფიალის ფსკერზე. მისი შედგენილობაა 0,02–0,05 % C; 0,05–0,07 % Mn; 0,02–0,16 % P; 0,02–0,04 % S.

ლითონის გამოსავალია კონვერტერში ჩასხმული თუჯის წონის 90–91 %. სათბობის ხარჯი მარტენის ლუმელში წიდის დნობაზე შეადგენს ლითონის წონის 2,5–4,5 %; ბოვში თუჯის დნობისას – 8 % და გაგლინვის წინ მახურებელ ლუმელში გახურებისას – 8 %.

ასტონ-ბაიერის ხერხით მიღებული ფოლადი ხარისხით არ ჩამორჩება პუდლინგურს, მაგრამ მასთან შედარებით პროცესი უფრო იაფი და მაღალი წარმადობისაა. ამასთანავე, ერთდროულად შეგეიძლია მივიღოთ, პუდლინგის ხერხთან შედარებით, უფრო დიდი წონის გუნდა (2,5 ტ), რომლის დამუშავებაც მოხდება საგლინავ ღვანზე.

1.2.7. ფოლადის წარმოების ქოთნური ხერხი

ქოთნური ხერხით რკინის მიღება რუსეთის ტერიტორიაზე წარმოებდა ძვ.წ.ა. VIII საუკუნეში. მაგრამ ამ ხერხით მიიღებოდა ცომისებური რკინა. ფოლადის დნობის ქოთნური ხერხი მოხსენიებული აქვს ძვ.წ.ა. IV საუკუნეში არისტოტელეს, მაგრამ გაურკვეველია, მიიღებოდა თუ არა ამ ხერხით თხევადი ფოლადი.

ფოლადის დნობის ქოთნური ხერხი ძალზე გავრცელებული იყო ახლო აღმოსავლეთში. ისტორიული წყაროებიდან ცნობილია, რომ XII საუკუნეში ქოთნური ხერხით თხევად ფოლადს იღებდნენ სირიაში და ამ ფოლადისგან მზადდებოდა განსაკუთრებულად ბასრი და მაღალი მკვეთელობის დამასკური ხმლები. ამდენად საფიქრებელია, რომ ქოთნური ხერხი არის თხევადი ფოლადის მიღების უძველესი ხერხი. შემდგომში ეს ხერხი მიივიწყეს და 1740 წ. იგი აღადგინა ინგლისში ბ. გენტსმანმა. მისი ხერხით შეედურ დანახშირბადიანებულ (ცემენტირებულ) ფოლადს ტიგელში აღნობდნენ მწვანე მინის ფლუსის ქვეშ.

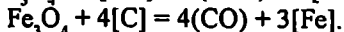
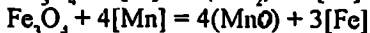
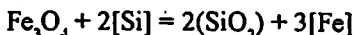
1801 წ. ინგლისელმა დ. მიუშეტმა აღმოაჩინა ფოლადის ხარისხზე მანგანუმის დადებითი გავლენა და კაჟში უმატებდა მანგანუმის მადანს განუანგვის მიზნით. თუმცა უნდა შევნიშნოთ, რომ ფოლადის მიღების პროცესში ქართველი მეტალურგების მიერ მანგანუმის გამოყენება ნახსენები აქვს ძვ.წ.ა. IV საუკუნეში ფსევდოარისტოტელეს. მისი სიტყვებით, ამ ღითონს „ქონდა „ვერცხლის ბზინვარება და უჟანგაობა“.

რუსეთში 1808 წ. ს. ბადაევიმა შემოიღო ორგანოფოსფორებიანი ღუმელი. იგი ჯერ ახდენდა რკინის ცემენტაციას და შემდეგ — დნობას. 1837 წ. პ. ანოსოვიმა შემოიღო აირული ცემენტაცია (დანახშირბადიანება) ტიგელში ფოლადის დნობის პროცესში, რის შედეგადაც დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 9–10 საათამდე, ნაცვლად რამდენიმე დღისა.

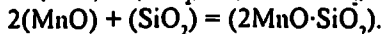
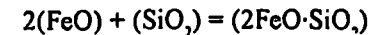
ქოთნური დნობის განსაკუთრებული ტექნოლოგია შეიმუშავა 1857 წ. პ. ოზუხოვიმა. ამ ხერხით ფოლადის დნობის დროს ქოთანში ლითონთან ერთად ამატებდნენ რკინის მადანს. ეს უსრუნველყოფდა ნახშირბადის განსხვავებული შედგენილობის საკაზმე მასალებიდან სასურველი შედგენილობის ფოლადის მიღებას.

ქოთნური ხერხით გამოდნობილი ფოლადი გამოირჩეოდა ძალზე მაღალი თვისებებით. მისგან ამზადებდნენ საათის ზამბარებს, სამართებლებს, ღანებს და ა.შ. ამის გამო ეს ხერხი კარგა ხანს გამოიყენებოდა და XX საუკუნის შუა პერიოდამდე შემორჩა შედეგთში, ინგლისში, საფრანგეთსა და გერმანიაში.

დნობა შემდეგნაირად მიმდინარეობდა: ცეცხლგამძლე მასალისგან გაკეთებულ ტიგელში (ქოთანში) ჩატვირთავდნენ 25–35 კგ ლითონურ კაჟს, რომელიც თავის შედგენილობით უახლოვდებოდა გამოსადნობ ფოლადს. ფაქტიურად ეს იყო გადადნობის ხერხი. საკაზმე მასალები გამოირჩეოდა ძალზე მაღალი სისუფთავით. ვინაიდან ქოთნურ პროცესში ყოფიერი და გოგირდი არ შორდებოდა. კაჟით გავსების შემდეგ ქოთანს ახურავდნენ სახურავს და ჩადგამდნენ სადნობ ქურაში ან რეგენერატორულ ალქმედ ღუმელში. ამრიგად ლითონური კაჟი მთლიანად იზოლირებული იყო სადნობი აგრეგატის ატმოსფეროსაგან და იგი დნებოდა ტიგელის კედლებიდან შემოსული სითბოს ხარჯზე. კაჟის გადნობის შემდეგ ტიგელში ხდებოდა მინარეგების ამოწვა და წილის წარმოქმნა



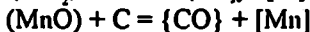
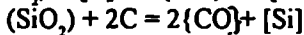
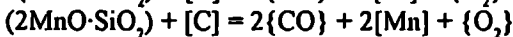
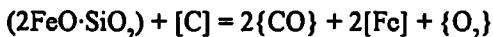
დაჟანგვის პროდუქტებისა და ქოთნის კედლის ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნებოდა წილა



ქოთნური პროცესის წიდა მუავე ბუნებისაა და იგი ძირითადად შედგება რკინისა და მანგანუმის ადვილდნობადი სილიკატებისაგან: ფაიალიტისა ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) (1205°C დნობის ტემპერატურით) და ტეფროიტიისაგან ($2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$) (1345°C დნობის ტემპერატურით).

ნახშირბადის ამოწვის პროცესში წარმოიქმნებოდა აირადი ნახშირჟანგი, რომელიც იწვევდა ლითონის დუღილს ტიგელში.

ტიგელში ატმოსფერო აღმდგენელი ბუნებისა იყო. რკინის ჟანგეულების გახარჯვის შემდეგ დუღილი წყდებოდა და ფოლადი დაწყნარდებოდა. ტიგელში ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ლითონში გახსნილი ნახშირბადი იწვევდა წიდის მინარეების აღდგენას.



ამ რეაქციების განვითარების შედეგად საგრძნობლად იცვლებოდა ლითონისა და წიდის შედგენილობა. დნობის ბოლოს ერთ-ერთი ნადნობის საბოლოო წიდა შემდეგი შედგენილობის იყო: 44,40 % SiO_2 ; 28,8 % Al_2O_3 ; 1,08 % FeO ; 24,04 % MnO და 1,27 % CaO .

დნობის დაშთაერების შემდეგ ლითონს განჟანგავდნენ ფერო-მანგანუმით, ტიგელს გამოიღებდნენ სადნობი აგრეგატიდან და ფოლადს ჩამოასხამდნენ ფორმებში.

ქოთნური ხერხით მიიღებოდა სხვადასხვა მარკის რიგითი ფოლადები, გარდა მცირენახშირბადიანისა, რომელიც ძნელდნობადია და მის მისაღებად საჭირო ტემპერატურა ვერ ვითარდებოდა ტიგელში.

ტიგელში გამოდნობილი ფოლადი გამოირჩეოდა მაღალი მექანიკური თვისებებით, მაღალი სიმკერით, არალითონური ჩანართებისა და აირების მცირე შემცველობით. ქოთნურ ფოლადს. სხვა ხერხით გამოდნობილთაგან განსხვავებით, დღემდე თვლიან შეუდარებლად.

1.2.8. ღრუბლოვანი რკინის წარმოება

ღრუბლოვანი რკინა მიიღება შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე მყარ მდგომარეობაში. გამოყენების სფეროს მიხედვით ღრუბლოვან რკინას სხვადასხვა მოთხოვნილება წაეყენება. გან-

საკუთრებით მნიშვნელოვანია რკინის ფხენილის მისაღებად ღრუბლოვანი რკინის გამოყენება. იგი უნდა იყოს ძალზე სუფთა, თითქმის ბოლომდე ადდგენილი და არ უნდა შეიცავდეს ნახშირბადს. მარტენის ღუმელში ან ელექტროფოლადადნობ ღუმელებში საკაზმე მასალად გამოსაყენებელ ღრუბლოვან რკინას ნაკლებად მკაცრი მოთხოვნები წაიყენება.

დღეისათვის ღრუბლოვანი რკინის მისაღებად იმდენად მრავალფეროვანი ხერხები არსებობს, რომ მათი სრული დახასიათებისათვის ერთი წიგნის მოცულობაც არ იკმარებს. მიუხედავად ამისა, ხერხების დაჯგუფება შესაძლებელია რკინის მიღების პრინციპით. ამ თვალსაზრისით ღრუბლოვანი რკინის მიღების შემდეგი სახეებია ცნობილი:

1. ქოთნებში (ტიგელში) მიღება;
2. მუფელის ღუმელებში აირების გაწოვით მიღება;
3. შახტურ ღუმელებში მიღება სითბოს წყაროდ კოქსის, ბუნებრივი აირის და ელექტროდენის (შიგა და გარე გახურების) გამოყენებით;
4. კამერული ღუმელების გამოყენება გარე გახურებით;
5. პერიოდული მოქმედების რეტორტების გამოყენება სტაციონარული გამფილტრავი ფენით;
6. მოძრავი ქვედიანი ღუმელების გამოყენება;
7. კოქსზე ან ბუნებრივ აირზე მომუშავე მბრუნავი ღუმელების გამოყენება ერთსაფეხურიანი, მრავალსაფეხურიანი და კომბინირებული პროცესებით;
8. მღულარე ფენის რეაქტორების გამოყენება.

მყარი სათბობის საშუალებით ღრუბლოვანი რკინის მიღების ყველა ხერხი, გოგირდის მოშორების მიზნით, ითვალისწინებს საკაზმე ნარევებში კირქვის გამოყენებას, აირადი სათბობის გამოყენებისას ხდება მისი გაწმენდა გოგირდისაგან.

ღრუბლოვანი რკინის ზემოჩამოთვლილი ხერხები განხორციელებული იყო ლაბორატორიულ, ნახევრად საწარმოო ან საწარმოო პირობებში.

განსაკუთრებით ყურადღებას იქცევდა ქარხანა ხოგანესის ქოთნური ხერხი, პროფ. მ. ვიბერგის ხერხით შახტურ ღუმელში ღრუბლოვანი რკინის მიღება. მოძრავ ქვედიან ღუმელში კაგანაფის ხერხით მადნიდან ფოლადის ფურცლის მიღება მეტალურგიული ციკლის (ბრძმედი – ფოლადის დნობა – გლინვა) გვერდის ავლით, რეტორტული ხერხი – ოხალატა და ლამინა.

ღრუბლოვანი რკინის მისაღებად საჭიროა მდიდარი რკინის მადანი და გოგირდისაგან თავისუფალი სათბობი. ამის გამო ამ

ხერხების გამოყენება შესაძლებელია მიხედვით ისეთ ქვეყნებში. სადაც უხვადაა მდიდარი რკინის მადნის საბადოები და მცირე რაოდენობითაა სათბობი. ასეთ შემთხვევაში განსაკუთრებით მიზანშეწონილია პროფ. მ. ვიბერგის ხერხის გამოყენება.

1.2.9. რკინის მიღება ელექტროლიზით

ელექტროლიტური რკინა პირველად მიიღო ბეტტეგერმა 1846 წ. შემდგომში ეს პროცესი დეტალურად შეისწავლეს აკადემიკოსებმა ლენცმა და კლეინმა 1860–1870 წლებში. აკად. მ. იაკობიმ ელექტროლიტური რკინის გამოყენება სახელმწიფო ქალაქების წარმოებაში დანერგა 1869 წ.

ელექტროლიტური რკინის მიღების ორი ხერხია ცნობილი:

1. 4–4,5 PH-ის მქონე 2-ნორმალური FeSO_4 ან FeCl_2 ხსნარში დალექვა 20–25 °C ტემპერატურაზე 10–100 ა/მ² დენის სიმკვრივისას;
2. 2 PH-ის მქონე 4–6-ნორმალურ FeSO_4 ან FeCl_2 ხსნარში დალექვა 90 °C ტემპერატურაზე 500–1500 ა/მ² დენის სიმკვრივისას.

კათოდზე დალექვისას რკინაში დიდი რაოდენობით იხსნება წყალბადი. 0,1 მმ Hg წნევისას 300 °C-მდე გახურებით შორდება ადსორბირებული წყალბადი, 700 °C-მდე გახურებისას კი – მყარ ხსნარში გახსნილი. მისი მოშორების სინქარე მაქსიმუმს აღწევს 850–900 °C ტემპერატურაზე.

ელექტროლიზისათვის ანოდის დასამზადებლად გამოიყენება მინარეებისაგან სუფთა რკინა. ხშირად ამ მიზნით ამზადებენ ანოდს არმკო* რკინისაგან და იშვიათ შემთხვევაში – კარბონილურისაგან**.

რკინის მიღება ელექტროლიზით ხდება ხსნადი ანოდების (ელექტროლიზური რაფინირება) ან უხსნადი ანოდების (ელექტროექსტრაქცია) გამოყენებით.

ხსნადი ანოდებით ელექტროლიზი ტარდება სულფატურ ხსნარებში 100 °C ტემპერატურაზე და 500–1000 ა/მ² დენის სიმკვრივისას. ანოდი მზადდება ტყვიისაგან. დენით გამოსავალი აღწევს 93–95 %-ს. ამ დროს მიიღება მყიფე მსხვილმარცვლოვანი ნალექი. იმ შემთხვევაში თუ ელექტროლიზი ჩატარდება ქლორიდული ხსნარის გამოყენებით, ნალექი იქნება წვრილმარცვლოვანი და პლასტიკური.

უხსნადი ანოდებით ელექტროლიზის დროს რეკომენდებულია 100–105 °C ტემპერატურა: 2 – ნორმალობის FeCl_2 და NaCl ხსნარში;

* არმკო რკინაში მინარეების რაოდენობა არ აღემატება 0,1 %-ს.

** კარბონილური რკინა მიიღება რკინა-ნახშირუხანგის (რკინის ჰენტიკარბონილის) თერმული დაშლით.

დენის სიმკრივე 1000–1500 ა/მ³. დენით გამოსავალია 95–97 %. ანოდებად გამოყენებულა გრაფიტი ან მაგნეტიტი. კათოდის ნახშირის შლამისგან დაცვის მიზნით ანოდს უკეთებენ ისოლდირებას ფტოროპლასტის კერამიკის დიაფრაგმით.

ელექტროლიზური ხერხით მიღებული რკინა გამოირჩევა ძალზე მაღალი სისუფთავით (ცხრ. 1.5).

(კხრილი 1.5

ელექტროლიზური რკინის შედგენილობა

მიღების მეთოდი	Fe	C	Si	S	P	Mn	O	H
სულფატური 25 °C-ზე	99,8...99,9	0,005...0,02	0,01	0,003...0,01	0,001	0,005	0,02...0,1	100...180 სპ 100 გ-ზე
ქლორიდული 25 °C-ზე	99,9	0,005...0,02	0,01	-	0,001	0,01	0,02...0,05	100...180 სპ 100 გ-ზე
ქლორიდული 100 °C ხსნადი ელექტროლით	99,8...99,9	0,01...0,03	0,02	-	0,01	0,01	0,02...0,05	0,005 °ა (მას)
ქლორიდული 100 °C უხსნადი ელექტროლით	99,9	0,001...0,003	-	-	0,005	0,01	0,02	0,005 °ა (მას)
გადაკრისტა- ლური მარილებისაგან	99,97	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,002	0,02	100 სპ 100 კ

1.2.10. მეტალურგიის მეცნიერების საფუძველი და მისი განვითარება

მეტალურგია, მიუხედავად მრავალსაუკუნოვანი არსებობისა და მისი ტექნოლოგიის განვითარებისა, XIX საუკუნის შუა ხანებამდე ხელოსნობად ითვლებოდა. მეტალურგიული ხელობის განვითარება და სრულყოფა ძირითადად ხდებოდა ცდისა და ცდომილების მეთოდის გათვალისწინებით. მრავალ ქვეყანაში ხარისხიანი ლითონის მიღებას უკავშირებდნენ ზეციურ ძალებს და სასურველი შედეგის მისაღებად გარკვეულ რიტუალებს ასრულებდნენ. ზოგჯერ ეს რიტუალები არაადამიანურ ხასიათს ატარებდა – მაგალითად, კარგი ხმლის ან ხანჯლის მისაღებად, იარაღისათვის ძალის მინიჭების მიზნით. წრთობისათვის იყენებდნენ ღონიერი მონის სისხლით წრთობას იარაღის კუნთებში ჩარჭობით. ცრურწმენასთან იყო აგრეთვე დაკავშირებული ქალის „მაწვეთვალის“ მოქმედება. ამიტომ რკინის სახელოსნოში დაუშვებელი იყო ქალის მისვლა.

მეტალურგიის, როგორც მეცნიერების ჩამოყალიბება სათავეს იღებს რუსი მეტალურგის პ. ანოსოვის (1799—1851 წწ.) საინჟინრო მოღვაწეობიდან. ახალგაზრდა სამთო ინჟინერმა თავისი მოღვაწეობა დაიწყო ზლატოუსტის სამეფო ქარხნებში, სადაც იმუშავა 30 წელი, შემდეგ კი სამთო ინჟინერთა კორპუსის გენერალ-მაიორის ჩინით სამუშაოდ გადავიდა ალტაის ქარხნებში. პ. ანოსოვი მრავალმხრივ სამუშაოებს ასრულებდა მეტალურგიაში. მას ეკუთვნის ქოთნური (ტიგელური) თხევადი ფოლადის მიღების და დანახშირბადიანების ტექნოლოგიის შემუშავება. განსაკუთრებით გაითქვა სახელი პ. ანოსოვმა ბულატის (ბასრი) ფოლადის მიღებით, რომლის საიდუმლოებაც დაიკარგა შუა საუკუნეებში. პ. ანოსოვის დამსახურებაა ფოლადის სტრუქტურაზე ქიმიური ელემენტების გავლენის საკითხის შესწავლა. მან პირველმა გამოიყენა მიკროსკოპი ფოლადების შინაგანი აგებულების შესასწავლად და საფუძველი ჩაუყარა ლითონების მიკროსკოპულ ანალიზს.

მეტალურგიული მეცნიერების შემდგომი განვითარება უკავშირდება რუსეთის არტილერიის გენერალ-მაიორის ნ. კალაკუცკის (1831—1889 წწ.) სახელს. მან პირველმა შეისწავლა ჭყდვის პირობებისა და ხერხების გავლენა ნაჭედის თვისებებზე და ახსნა ფოლადში მეტალურგიული დეფექტების წარმოქმნის მიზეზები; ა. ლავროვთან ერთად ახსნა ფოლადში ლიკვაციური მოვლენების განვითარების მიზეზები და ჩაატარა კვლევები საზარბაზნე ლულების შესარჩევად.

ნ. კალაკუცკის პარალელურად მუშაობდა ა. ლავროვი (1838—1904 წწ.). საარტილერიო აკადემიისა და სამთო ინსტიტუტის დამთავრების შემდეგ მუშაობდა ზლატოუსტში ფოლადის ზარბაზნების ქარხანაში. ა. ლავროვმა წამოაყენა თეორია, რომლის თანახმაც ფოლადი წარმოადგენს ნახშირბადის მყარ ხსნარს რკინაში. მან ნ. კალაკუცკისთან ერთად ახსნა ფოლადში ლიკვაციური მოვლენების განვითარების მიზეზები და დაადგინა ფოლადის ზოლის მასის გავლენა ლიკვაციაზე. მანვე აღწერა ფოლადის ზოდში აირული ჩანართებისა და ჩაჯდომის ნიჟარის წარმოქმნის მიზეზები. დაამუშავა ბოცვის რაკიონალური კონსტრუქცია. ა. ლავროვმა მსოფლიოში პირველმა გამოიყენა ალუმინი ფასონური სხმულეებისათვის განკუთვნილი ფოლადების განუანგვის მიზნით. მასვე ეკუთვნის წინადადება ბოცვში ფოლადის გახურების მიზნით თერმიტული ფხვნილების გამოყენების შესახებ.

განუზომლად დიდია მეტალურგიული მეცნიერების განვითარებაში დ. ჩერნოვის (1839—1921 წწ.) დამსახურება. პრაქტიკული ტექნოლოგიური უნივერსიტეტის დამთავრების შემდეგ მუშაობა

დაიწყო პეტერბურგის ზარაფხანაში, შემდეგ კი გადავიდა ობუ-
ხოვის ფოლადსახმელ ქარხანაში. დ. ჩერნოვი იყო მრავალმხრივი
მოღვაწე მეცნიერი. პ. ანოსოვის, ნ. კალაკუცკისა და ა. ლავროვის
შრომების ანალიზისა და საზარბაზნე ლულების ნაჭედების წუნის
შესწავლის შედეგად დაადგინა ცხელი მექანიკური და თერმული
დამუშავების გავლენა ფოლადის თვისებებზე. მანვე აღმოაჩინა
კრიტიკული ტემპერატურები, რომელთა დროსაც ადგილი აქვს
ლითონში ფაზურ გარდაქმნებს (ე.წ. ჩერნოვის წერტილები). დ.
ჩერნოვმა შექმნა რკინა-ნახშირბადის მდგომარეობის დიაგრამის
მონაჩაზი. მასვე ეკუთვნის კრისტალიზაციის თეორიის ჩამოყალი-
ბება. დაასაბუთა ფოლადის განუანგვის ხარისხის გავლენა მის
თვისებებზე და კომპლექსური განმუანგველების გამოყენების დად-
ებითი გავლენა აირული ბუშტულებისაგან სუფთა, მკერივი ლითონის
მისაღებად. დ. ჩერნოვის დამსახურებაა 1872 წ. კონვერტერული
დნობისათვის მცირე სილიციუმიანი თუჯის ბოვში წინასწარი
გახურების საკითხის დამუშავება. ამის შედეგად შეიქმნა რუსული
ბესემერების ვარიანტი. წამოაყენა წინადადება დნობის პროცესის
ინტენსიფიკაციის მიზნით კონვერტერში შესაბერი პაერის ჟანგბა-
დით გამდიდრების შესახებ. დ. ჩერნოვმა გამოიყენა სპექტროსკოპი
ბესემერული დნობის დამთავრების დასადგენად. დ. ჩერნოვი
ითვლება თანამედროვე ლითონმცოდნეობის ფუძემდებლად.

მებრძმედ მეტალურგთა მამამთავარი, საბჭოთა აკადემიკოსი
მ. პავლოვი (1863—1958 წწ.) პეტერბურგის სამთო ინსტიტუტის
დამთავრების შემდეგ მოღვაწეობას იწყებს ვიატკის გუბერნიის
მეტალურგიულ ქარხნებში. ჩაატარა ბრძმედისა და პუდლინგის
ღუმელების რეკონსტრუქცია. სულინის ქარხანაში აითვისა და
სრულყო ბრძმედში დნობა ანტრაციტის გამოყენებით. მ. პავლოვი
მოღვაწეობდა რუსეთის და უკრაინის მრავალ უმაღლეს სასწავლე-
ბელში, ხელმძღვანელობდა ბრძმედის დნობაში ტორფის გამოყე-
ნების საკითხების შესწავლას. დიდი ღვაწლი დასდო მეტალურ-
გიაში ჟანგბადის გაქრევის ჩანერგვას. მონაწილეობდა მძლავრი
მეტალურგიული ქარხნებისათვის ბრძმედებისა და ფოლადსადნობი
აგრეგატების დაპროექტებაში. მ. პავლოვმა შექმნა თუჯის მეტა-
ლურგიის უნიკალური სახელმძღვანელოები და გამოაქვეყნა ბრძმე-
დის ღუმელების ატლასი.

სრულიად ახალი მიმართულება განავითარა მეტალურგიაში
საბჭოთა აკადემიკოსმა ა. ბაიკოვმა (1870—1946 წწ.). ადღენითი
და დაჟანგვითი პროცესების ასახსნელად მან პირველმა დაიწყო
ფიზიკური ქიმიის კანონების გამოყენება. შექმნა პირველი სახელმ-
ძღვანელო მეტალურგიული პროცესების თეორიაში და 1908

წლიდან შემოიღო ეს საგანი პეტერბურგის ტექნოლოგიურ ინსტიტუტში. ა. ბაიკოვმა დაადგინა გარდამავალ ლითონთა ჟანგეულების აღდგენის საფუძვლები პრინციპი. იგი მუშაობდა ფოლადების გარდაქმნის საკითხებზე და დაამტკიცა აუსტენიტის ფაზის არსებობა. შეისწავლა ნიკელის პოლიმორფიზმი, სპილენძის შენადნობები. მათი წროობის საკითხები. ახსნა ნემსისებური სტრუქტურის წარმოქმნის მიზეზები. ა. ბაიკოვმა შეისწავლა აგრეთვე რკინა-ნახშირბადის მაღალნახშირბადიანი ფაზები. მას ეკუთვნის ფრთიანი გამოთქმა: „მეტალურგია მაღალტემპერატურული ქიმიია“.

ა. ბაიკოვის წამოწყება მეტალურგიული პროცესების ასახსნულად ფიზიკური ქიმიის კანონების გამოყენების შესახებ აიტაცეს მისმა თანამედროვეებმა ვ. გრუმ-გრეიმაილომ და მ. კარნაუხოვმა.

საბჭოთა აკადემიის წევრ-კორესპონდენტმა ვ. გრუმ-გრეიმაილომ (1864—1928 წწ.) პრაქტიკული მოღვაწეობა დაიწყო ურალის ქარხნებში. შემდეგ მუშაობდა პეტერბურგის პოლიტექნიკურ ინსტიტუტში და ურალის სამთო ინსტიტუტებში. მუშაობდა მეტალურგიული ქარხნებისა და აგრეგატების დაპროექტებაზე. პეტერბურგის ტექნოლოგიურ ინსტიტუტში მუშაობის პერიოდში იგი გაქყვა ა. ბაიკოვის მიერ ნახევრებ გზას და პირველმა გამოიყენა ფიზიკური ქიმიის კანონები: მოქმედ მასათა კანონი და წონასწორობის მუდმივას ტემპერატურული დამოკიდებულების კანონი ბესემერის კონვერტერსა და მარტენის ღუმელში მიმდინარე ფოლადის დნობის პროცესების ასახსნელად. რაც გადმოცემული აქვს „ფოლადის მეტალურგიის“ სახელმძღვანელოში.

საბჭოთა აკადემიკოსი მ. კარნაუხოვი (1892—1955 წწ.) მუშაობდა ალაპავესკის მეტალურგიულ ქარხანაში. 1920 წლიდან პეტროგრადის პოლიტექნიკური ინსტიტუტის თანამშრომელია. მ. კარნაუხოვის ძირითადი შრომები ეხება ბესემერის, თომასისა და მარტენის პროცესების შესწავლას. რაც ჩამოყალიბებულია მის მიერ შექმნილ „ფოლადის მეტალურგიის“ სამტომეულში. ფოლადის დნობის პროცესების აღწერისათვის და დნობისას მინარევების დაჟანგვის თანამიმდევრობის ასახსნელად მან გამოიყენა ფიზიკური ქიმიის ცნება დისოციაციის დრეკადობის შესახებ.

საბჭოთა აკადემიკოსი ი. ბარდინი (1883—1960 წწ.), მეცნიერებათა აკადემიის ვიცე-პრეზიდენტი, ინსტიტუტის დამთავრების შემდეგ მუშაობას იწყებს აშშ-ში, შემდეგ კი გადმოდის სამხრეთ რუსეთის ქარხნებში სამუშაოდ. განათლებით მებრძმდე ინჟინერი მრავალმხრივ საინჟინრო და მეცნიერულ მუშაობას ეწეოდა მეტალურგიაში. ი. ბარდინის ხელმძღვანელობით აშენდა კუზნეცკის

გიგანტური მეტალურგიული კომბინატი. იგი მუშაობდა მეტალურგიული ქარხნების დაპროექტებაზე, ახალი მეტალურგიული ავრეგატების შექმნაზე. განუზომლად დიდია ი. ბარდინის როლი საბჭოთა მეტალურგიის განვითარებაში. მისი საერთო ორგანიზაციული ხელმძღვანელობით ტარდებოდა სამუშაოები მეტალურგიული პროცესების ინტენსიფიკაციისათვის ჟანგბადის გამოსაყენებლად. ი. ბარდინი აქტიურად მოღვაწეობდა ახალი მეტალურგიული ნედლეულის კომპლექსური გამოყენების საკითხზე. მისი უშუალო ხელმძღვანელობით დაპროექტდა და აიგო ნოვო-ტელის მეტალურგიულ ქარხანაში პირველი უწყვეტი ჩამოსხმის ვერტიკალური დანადგარი. ი. ბარდინი იყო მეცნიერებათა აკადემიის მეტალურგიის ინსტიტუტის და შავი მეტალურგიის (კენტრალური სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის) დირექტორი. პედაგოგიურ მოღვაწეობას ეწეოდა მოსკოვის ფოლადის ინსტიტუტში.

საბჭოთა აკადემიკოსმა ა. სამარინმა (1902—1970 წწ.) მოსკოვის სამთო აკადემიის მეტალურგიული ფაკულტეტის დამთავრების შემდეგ მუშაობა დაიწყო მოსკოვის ახლად გახსნილ ფოლადის ინსტიტუტში. შემდეგ ერთდროულად იყო მეცნიერებათა აკადემიის მეტალურგიის ინსტიტუტის დირექტორის მოადგილე. სტაჟირება გაიარა აშშ-ში გამოჩენილ ამერიკელ მეცნიერთან ჯ. ჩი.მენტან. ა. სამარინი ძირითადად მუშაობდა ფოლადისა და ფეროშენადნობების ელექტრომეტალურგიაში. ამუშაებდა მეტალურგიული პროცესების ფიზიკურ-ქიმიურ საკითხებს. მრავალი ნაშრომი მიუძღვნა განუანგვისა და დესულფურაციის საკითხებს - პროფ. ტომკინთან და ლ. შვარცმანთან ერთად ახსნა დესულფურაციის თავისებურებანი წიდების სრულყოფილი იონური ხსნარების თეორიის გამოყენებით. ა. სამარინი სწავლობდა კომპლექსური განმუანგველების გამოყენების საკითხებს. წიდური ნაღვლებების ბუნებას და ვაკუუმური მეტალურგიის პრობლემებს.

ხანმოკლე, მაგრამ ნაყოფიერი იყო ქართველი მეტალურგისა და მათემატიკოსის გ. ნიკოლაძის (1888—1931 წწ.) მოღვაწეობა. 1913 წ. გ. ნიკოლაძემ დაამთავრა პეტერბურგის ტექნოლოგიური ინსტიტუტი. მუშაობდა თავდაპირველად ტულის მეტალურგიულ ქარხანაში, შემდეგ კი რუსეთის სამხრეთის მეტალურგიულ ქარხნებში. იგი მუშაობდა საბრძმედუ წარმოების თვალსაჩინო სპეციალისტის მ. კურაკოს ხელმძღვანელობით. ბრძმედის საამქროში იგი ი. ბარდინთან ერთად მოღვაწეობდა.

1923 წ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში დაიწყო ინჟინერ-მეტალურგთა მომზადება გ. ნიკოლაძის ხელმძღვანელობით. 1928—1929 წლებში იგი დაბრუნდა საზღვარგარეთის ხანგრ-

ძლიერი მივლინებიდან. კიდევბეში ააგო საცდელი ელექტროლუმენი ჭიათურის მანგანუმის მადნების გადამუშავების შესაძლებლობის შესასწავლად. გ. ნიკოლაძის ხელმძღვანელობით საცდელ დნობებს ატარებდნენ შემდგომში ცნობილი მეტალურგები, იმჟამად კი უფროსკურსელები ე. ნადირაძე, ა. ხეჩია, ი. კეკელიძე, პ. ჯავახაძე, შ. ფხაკაძე, ლ. მელაძე, გ. შათირიშვილი და ტექნიკოსი ი. ლორთქიფანიძე. გ. ნიკოლაძე მოულოდნელად გარდაიცვალა ფილტვების კრუპოზული ანთებით, მაგრამ მისმა სტუდენტებმა გააგრძელეს დაწყებული საქმე და მიღებული შედეგები მოახსენეს 1932 წ. ჩელიაბინსკის ფეროშენადნობთა I საკავშირო კონფერენციას. ამ მონაცემების საფუძველზე გადაწყდა ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის მშენებლობა, რომელიც ამოქმედდა 1933 წ. და ღირსეულად ატარებს პროფ. გ. ნიკოლაძის სახელს. გ. ნიკოლაძის მიერ 1928 წ. ჩამოყალიბებულმა შავი ლითონების მეტალურგიის კათედრამ იარსება 1937 წლამდე და გამოიწმევა მეტალურგთა პირველი ნაკადის ბოლო ჯგუფის სტუდენტები.

რუსეთისა და საქართველოს მეტალურგიის დიდი ამაგი დასდო პროფ. ნ. ქაშაკაშვილმა (1888—1967 წწ.). პეტერბურგის პოლიტექნიკური ინსტიტუტის დამთავრების შემდეგ, თავისი მასწავლებლის მ. პავლოვის რეკომენდაციით შრომითი საქმიანობა დაიწყო ურალში, სადაც განელო გზა კუშვინის ქარხნის ცენტრალური ლაბორატორიის გაშვის თანამდებობიდან ტრესტ „ურალმეტის“ ტექნიკურ დირექტორობამდე. ნ. ქაშაკაშვილი ხელმძღვანელობდა დასავლეთ ციმბირში, ურალში, ვერხნისეტსკის, ზლატოუსტის, ტაგილის მეტალურგიული ქარხნების აღორძინებას, ურალმაშის მანქანათმშენებლობის, მაგნიტოგორსკის, ჩელიაბინსკის ელექტრომეტალურგიული, პერვოურალსკის მილების ქარხნების მშენებლობას, ახალი ტექნოლოგიების ათვისებას, მეტალურგიული გიგანტების დაპროექტებას და მშენებლობას. 1932 წ. სამუშაოდ გადაიყვანეს „იუსტალის“ მთავარი ინჟინრის თანამდებობაზე. იგი ხელმძღვანელობდა სამხრეთის მეტალურგიული ქარხნების მშენებლობას. 1940 წლიდან ნ. ქაშაკაშვილს ნიშნავენ ამიერკავკასიის მშენებარე მეტალურგიული ქარხნის მთავარ ინჟინრად და დირექტორის მოვალეობის შემსრულებლად. სამამულო ომის წლებში ხელმძღვანელობდა უკრაინის დემონტირებული მეტალურგიული ქარხნების ევაკუაციას საქართველოს გავლით და მათ გატანას ურალში. 1944 წ. მისი ინიციატივით განახლდა რუსთავის მეტალურგიული ქარხნის მშენებლობა. მის ბაზაზე აშენდა ქიმიური, ქიმიური ბოჭკოს, ცემენტის, ამწემშენებელი, საჩამოსხმო ქარხნები და სხვა საწარმოები. ჩამოყალიბდა ქ. რუსთავი ისტორიული

ბოსტან-ქალაქის ადგილას. მეტალურგიული ქარხნისათვის საჭირო იყო ნაციონალური კადრები. ნ. ქაშაკაშვილის წინადადებით თავდაცვის სახელმწიფო კომიტეტმა 5 ათასი წვევამდელი სამხედრო სამსახურის ნაცვლად გაგზავნა უკრაინისა და რუსეთის მეტალურგიულ ქარხნებში სხვადასხვა მეტალურგიული სპეციალობების ასათვისებლად. საინჟინრო და ტექნიკური კადრების მომზადების მიზნით ნ. ქაშაკაშვილის ინიციატივით თბილისში გაიხსნა მეტალურგიული ტექნიკეში. ხოლო საქართველოს პოლიტექნიკურ ინსტიტუტში, აკად. ფ. თავაძესა და პროფ. ა. ხვიჩიასთან ერთად, დასვა საკითხი საინჟინრო კადრების მომზადების შესახებ. რის შედეგადაც 1949 წ. მიიღეს სტუდენტ-მეტალურგთა პირველი წყება. 1953 წლიდან ნ. ქაშაკაშვილი სამუშაოდ გადადის საქართველოს პოლიტექნიკურ ინსტიტუტში შავი ლითონების მეტალურგიის კათედრაზე. მისი მასწავლებლის აკად. მ. პავლოვის რეკომენდაციით ინსტიტუტის სამეცნიერო საბჭომ მეტალურგიაში გაწეული დიდი პრაქტიკული და მეცნიერული საქმიანობისათვის ნ. ქაშაკაშვილს მიანიჭა პროფესორის წოდება. პროფ. ნ. ქაშაკაშვილის თაონსობით ჩამოყალიბდა საქართველოს შავი მეტალურგიის სამეცნიერო-ტექნიკური საზოგადოება, და თავად იყო მისი უცვლელი თავმჯდომარე. მისივე ინიციატივით საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიაში გაიხსნა ლითონებისა და სამთო საქმის ინსტიტუტი.

მეტალურგიული მეცნიერების შემდგომი განვითარება დაკავშირებულია ა. ბაიკოვის, ი. ბარდინის, ვ. გრუმი-გრუნიმაილოს, მ. კარნაუხოვისა და ა. სამარინის მოწაფეების სახელებთან. თანდათანობით ძლიერდებოდა ფიზიკურ-ქიმიური თვალთახედვით მეტალურგიული პროცესების უამრავი საკითხის ანალიზი. განსაკუთრებით გამოირჩეოდნენ პროფ. ბ. სტარკი, აკად. ნ. დობროხოტოვი, პროფ. ვ. იაგოისკი, აკად. ვ. ელიუტინი. პროფ. ს. როსტოვეცემა გამოაქვეყნა მეტალურგიული პროცესების თეორიის ფუნდამენტური სახელმძღვანელო, ხოლო ურალში მოღვაწე პროფესორებმა ო. ესინმა და პ. გელდმა გამოაქვეყნეს „პირომეტალურგიული პროცესების ფიზიკური ქიმიის“ უნიკალური ორტომეული. ამ წამოწყებებს აგრძელებენ თანამედროვე მეცნიერი მეტალურგები.

რუსი და საბჭოთა მეტალურგების პარალელურად დიდ სამეცნიერო სამუშაოებს ატარებენ საზღვარგარეთელი მეცნიერები. გერმანელმა მეცნიერმა პ. შენკმა თანამიმდევრულად გამოიყენა ქიმიური თერმოდინამიკა ფოლადის დნობის პროცესების ასახსნელად და წარმოადგინა „მეტალურგიული პროცესების ფიზიკური ქიმიის“ ორტომეული. მასვე ეკუთვნის წიდეების აგებულების მოლეკულური თეორიის შემუშავება. ამ თეორიას ბევრი მეცნიერი იზიარებდა როგორც ევროპაში, ისე მის ფარგლებს გარეთაც.

უმდიდრესი მასალა შეკრიბეს წიდების მოლექულოური თეორიის გამოყენების შესახებ ამერიკელმა მეცნიერებმა გრანტმა და ჯ. ჩიკმენმა. თუმცა უნდა ითქვას, რომ 1916 წ. ეანიუკოვს გამოთქმული ჰქონდა აზრი წიდების იონური აგებულების შესახებ. ამ აზრს ემხრობოდნენ გერმანელი მეცნიერები ჰ. ტამანი და ფ. ზაუერვალდი. მეტალურგიაში ფიზიკური ქიმიის გამოყენების ფუნდამენტური შრომები აქვთ გამოქვეყნებული ამერიკელ მეცნიერებს: ო.კუბაშევსკის, ევანსს, ოლკოკს, ელიოტსა და ე. ტურკდოგანს.

განსაკუთრებული აღნიშვნის ღირსია ინგლისელი მეცნიერის კ. ვაგნერის შრომა „შენადნობთა თერმოდინამიკა“, სადაც ლითონში გახსნილი ელემენტების აქტიურობის შესწავლა სრულიად ახალი მიდგომით ხდება. მან პირველმა შემოიტანა ცნება „ურთიერთქმედების პარამეტრი“, რომელიც ითვალისწინებს ლითონში გახსნილი ელემენტის აქტიურობასე სხვა ელემენტის გავლენას ბინარულ და მრავალკომპონენტთან ხსნარებში. ამ მიმართულებით გარკვეული სამუშაოები ჩაატარეს სიგვორტმა და ინგლისელმა კ. ლიუპისმა, რომელთა კალამსაც ეკუთვნის ფუნდამენტური შრომა „მასალათა თერმოდინამიკა“.

ასე შეიქმნა მეტალურგიული პროცესების ფიზიკური ქიმია, რომელიც წარმოადგენს ფუნდამენტურ დისციპლინას. იგი ემყარება ფიზიკას, ქიმიას, ფიზიკურ ქიმიასა და მათემატიკას.

II ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

ფოლადსადნობი პროცესების ძირითადი თეორიული საფუძვლები

თ ა ვ ი I

ქიმიური თერმოდინამიკის საფუძვლები

პროცესები ფოლადსადნობ ღუმელებში მიმდინარეობს მაღალი ტემპერატურის პირობებში. ამასთან, თხევადი ფოლადი შეიცავს მრავალ ელემენტსა და ნაერთს, რომლებიც ამ ტემპერატურაზე ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან. წიდასა და ამონაგთან. ამის გამო სადნობ ღუმელში მიმდინარე პროცესის შესწავლა საკმაოდ რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ეს პროცესები ყველაზე კარგად აღიწერება ქიმიური თერმოდინამიკის გამოყენებით. ამ თავში მოყვანილი მასალა საშუალებას მისცემს მკითხველს შეითვისოს და პრაქტიკულად გამოიყენოს თერმოდინამიკის ძირითადი დებულებები ფოლადსადნობი წარმოების მთელი რიგი ამოცანების გადასაწყვეტად.

2.1.1. თერმოდინამიკის განსაზღვრა და ტერმინოლოგია ძირითადი ცნებები

თერმოდინამიკა შეისწავლის ენერჯიის ერთი ფორმის მეორეში გადასვლის კანონებს. იგი განსაზღვრავს მოცემულ პირობებში პროცესის მიმართულებას და მისი მსვლელობის პრინციპულ შესაძლებლობას. პროცესის მექანიზმსა და მისი მიმდინარეობის სინქარეს თერმოდინამიკა არ სწავლობს. განახსებავენ ქიმიურ და ტექნიკურ თერმოდინამიკას. ვინაიდან მეტალურგიაში მიმდინარე პროცესი ქიმიური ხასიათისაა, ამიტომ მეტალურგიის პრაქტიკული და თეორიული საკითხების გადასაწყვეტად იყენებენ ქიმიურ თერმოდინამიკას.

ქიმიური თერმოდინამიკის ტერმინოლოგია არ განსხვავდება ზოგადი თერმოდინამიკის ტერმინოლოგიისაგან. თერმოდინამიკის კანონების დასადგენად ცნობილი უნდა იყოს სისტემის საწყისი

და საბოლოო მდგომარეობები და ის გარე პირობები. რომლებშიც მიმდინარეობს პროცესი.

თერმოდინამიკაში სხეულს ან ურთიერთმოქმედ სხეულთა ერთობლიობას სისტემა ეწოდება. სისტემას აცალკევებენ გარემოსაგან. თუ ს ი ს ტ ე მ ა არ ურთიერთქმედებს გარემოსთან, არ ეცვლება მოცულობა, არ ხდება სითბოსა და მუშაობის გაცვლა, მას ი ს ო ლ ი რ ე ბ უ ლ ს უწოდებენ.

სისტემა ჰ თ მ ო გ ე ნ უ რ ი ა, თუ მის შიგნით არ არსებობს თვისებებით განსხვავებული ნაწილების გამყოფი ზედაპირები. ისეთ სისტემას, რომელშიც ასეთი გამყოფი ზედაპირები არსებობს ჰ ე ტ ე რ ო გ ე ნ უ ლ ს უწოდებენ.

ფ ა ზ ა ეწოდება სისტემის ყველა კომპოზენური ნაწილის ერთობლიობას, რომლებიც ერთნაირია შედგენილობით, ქიმიური და ფიზიკური თვისებებით და სისტემის სხვა ნაწილებისაგან გამოყოფილია გამყოფი ზედაპირით. მაგალითად, წყლისა და ყინულისაგან შედგენილი სისტემა ორფაზიანია, მიუხედავად იმისა, თუ ყინულის რამდენი ნაჭერია წყალში.

დ ა ხ უ რ უ ლ ი ეწოდება სისტემას, რომელიც არ აწარმოებს გარემოსთან ნივთიერების ურთიერთგაცვლას, მაგრამ შეუძლია მასთან ენერგიის გაცვლის პროცესში იყოს. ღია სისტემა აწარმოებს ნივთიერების გაცვლას გარემოსთან. ყოველი თერმოდინამიკური სისტემა განისაზღვრება თვისებათა გარკვეული ერთობლიობით. სისტემის თვისებები შეიძლება დაეყოს ჰ ს ი უ რ და ინ ტ ე ნ ს ი უ რ თვისებებად. სისტემის ექსტენსიური თვისებები დამოკიდებულია შემადგენელი ნივთიერების მასებზე (მაგალითად, მოცულობა, სითბოტევადობა. შიგა ენერგია, ენთალპია, ენტროპია და სხვ.). ექსტენსიურ თვისებებს ახასიათებს ადიტიურობა. სისტემის ინტენსიური თვისება არ არის დამოკიდებული მასებზე და თუ სისტემა წონასწორობაშია, ეს თვისებები ერთნაირია სისტემის ყოველ წერტილში. ინტენსიური თვისებები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია თერმოდინამიკური გამოთვლებისას. ასეთებია p – წნევა, T – ტემპერატურა, v – მოლური მოცულობა და სხვა.

თვისებებს, რომლებიც ცალსახად განისაზღვრება სისტემის მდგომარეობით, მ დ გ ო მ ა რ ე ო ბ ი ს პ ა რ ა მ ე ტ რ ე ბ ს უწოდებენ (ტემპერატურა, წნევა, მოცულობა, შიგა ენერგია და სხვ.). მდგომარეობის პარამეტრის მნიშვნელობა არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ როგორ მოვიდა სისტემა მოცემულ მდგომარეობაში.

სისტემაში მიმდინარე ნებისმიერი ცვლილებისას, მდგომარეობის ერთი თერმოდინამიკური პარამეტრი მაინც იცვლება.

პ რ ო ც ე ს ი ს თ ე რ მ ო დ ი ნ ა მ ი კ უ რ ი პ ა რ ა მ ე ტ რ ი, ანუ პ რ ო ც ე ს ი ს პ ა რ ა მ ე ტ რ ი, ეწოდება ნებისმიერ

თერმოდინამიკურ სიდიდეს, რომელიც პროცესის მახასიათებლად გამოდგება ("შიგა ენერჯის ცვლილება, რეაქციის სითბური ეფექტი) აორთქლების სითბო და სხვ.).

სისტემის ძირითად პარამეტრებად ითვლება ისინი, რომელთა განსაზღვრა ცდით შეიძლება. ეს არის: p - წნევა (ფართობის ერთეულზე მოქმედი მართობული ძალა), T - ტემპერატურა (მოლეკულების სითბური მოძრაობების ინტენსიურობის ზომა) და v - მოლური მოცულობა. ხსნარებისათვის კონცენტრაცია (ძირითადი პარამეტრია. დანარჩენი პარამეტრები ძირითადი პარამეტრების ფუნქციებია.

სისტემის პარამეტრები ერთმანეთს უკავშირდება დამოკიდებულებებით, რომლებსაც მდგომარეობის განტოლებებს უწოდებენ. მდგომარეობის განტოლება ზოგადად გამოისახება ასე:

$$f(p, v, T) = 0. \quad (2.1)$$

თერმოდინამიკურ ფუნქციებს, რომლებიც მხოლოდ სისტემის მდგომარეობაზეა დამოკიდებული ("შიგა ენერჯია, ენთალპია და სხვ.) მდგომარეობის ფუნქციებს უწოდებენ. მათი ცვლილება მხოლოდ საწყის და საბოლოო მდგომარეობაზეა დამოკიდებული. ფუნქციებს, რომელთა მნიშვნელობა დამოკიდებულია პროცესის მიმდინარეობის გზაზე, პროცესის ფუნქციებს უწოდებენ (სითბო, მუშაობა).

თერმოდინამიკაში შეისწავლება შემდეგი პროცესები: იზოთერმული - მუდმივი ტემპერატურის პირობებში მიმდინარე ($T = \text{const}$); იზობარული - მიმდინარე მუდმივი წნევის პირობებში ($p = \text{const}$); იზოქორული - მუდმივი მოცულობის პირობებში მიმდინარე ($v = \text{const}$) და ადიაბატური - სითბოს ცვლის გარეშე მიმდინარე პროცესები ($q = 0$).

პროცესს, რომლის შედეგად სისტემა (განიცადა რა გარკვეული ცვლილებები) უბრუნდება საწყის მდგომარეობას, ეწოდება წრითული პროცესი ანუ ციკლი. თუ საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება ისე ხდება, რომ სისტემა გადის პირდაპირი პროცესის დროს გავლილ ყველა მდგომარეობას, პროცესს შექცევადი ეწოდება. შექცევადი პროცესი მიმდინარეობს ხახუნის გარეშე, უმნიშვნელო სიჩქარით. ამავე დროს სისტემის მდგომარეობა ყოველთვის მიახლოებულია წონასწორულთან. ამ პროცესის უკუმიმართულებით მიმდინარეობის ერთადერთი შედეგია სისტემის და გარემოს დაბრუნება საწყის მდგომარეობაში. თუ პროცესის უკუმიმართულებით დინების შედეგად სისტემაში ან გარემოში რაიმე ცვლილებები შეინიშნება, მაშინ პროცესი შუქცევადი.

მდგომარეობის პარამეტრის ცვლილება არ არის დამოკიდებული პროცესის შექცევადობაზე, რადგან მდგომარეობის პარამეტრის ცვლილების დასადგენად საჭიროა მხოლოდ საწყისი და საბოლოო მდგომარეობის ცოდნა.

ბუნებაში ყველა თავისთავად მიმდინარე პროცესი შეუქცევადია. თერმოდინამიკაში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შექცევადი პროცესის ცნება. კლასიკურ თერმოდინამიკაში შეუქცევადი პროცესები არ განიხილება.

მეტალურგიული პროცესების გაანგარიშებისას ძირითადად სარგებლობენ შიგა და მოცულობითი ენერგიები.

შიგა ენერგია U წარმოადგენს სისტემის ენერგიის სრულ მარაგს, რომელიც მოიცავს მოლეკულების წინსვლით და ბრუნვით მოძრაობას, მოლეკულაში ატომების რხევას; ბრუნვისა და მათ ბირთვებში თავმოყრილ ენერგიებს; გარდა ამისა, – ნაწილაკთა ურთიერთქმედების პოტენციურ ენერგიას. თერმოდინამიკაში სარგებლობენ შიგა ენერგიის არა აბსოლუტური მნიშვნელობით, რომლის განსაზღვრაც საკმაოდ რთული ამოცანაა, არამედ მისი ცვლილებებით ΔU (ან dU).

მოცულობითი pV ენერგია წარმოადგენს იმ ენერგიას, რომელიც უნდა დაიხარჯოს p წნევის პირობებში სივრცის მოცულობის ზრდაზე 0 -დან V მნიშვნელობამდე. კონდენსირებულ სისტემებში ზოგიერთი რეაქცია მიმდინარეობს აირის წარმოქმნით, ე.ი. მოცულობის ზრდით. სწორედ ამ პროცესებისათვისაა მხედველობაში მისაღები მოცულობითი ენერგია.

შიგა და მოცულობითი ენერგიების ჯამს წარმოადგენს ენტალპია $U+pV=H$. კონდენსირებული სისტემებისათვის, რომლებიც იმყოფება დაბალი წნევის პირობებში, pV სიდიდე მეტად მცირეა და ამიტომ $H=U$. სისტემებისათვის, რომლებშიც მონაწილეობს აირები, pV სიდიდე საკმაოდ დიდია და ენთალპია საგრძნობლად განსხვავდება შინაგანი ენერგიისაგან. ამ შემთხვევაში ენთალპიის ნამატი გამოისახება ტოლობით

$$dH=d(U+pV)=dU+pdV+Vdp$$

თუ კი აირი ხურდება მუდმივი წნევის პირობებში, მაშინ

$$Vdp=0 \text{ და } dH=dU+pdV. \quad (2.2)$$

ამრიგად, მუდმივი წნევის პირობებში აირის გასახურებლად მიყვანილი ენერგიის (dH ჯოული) ნაწილი იხარჯება აირის შიგა ენერგიის ზრდაზე, ხოლო ნაწილი – გაფართოების მუშაობაზე, რომელსაც სისტემა გარედან მოქმედი წნევის წინააღმდეგ ასრულებს.

შიგა ენერჯიის ნამატი გამოისახება ტოლობით

$$dU = C_v \cdot dT,$$

სადაც C_v არის მუდმივი მოცულობის პირობებში 1 მოლი აირის ერთი გრადუსით გათბობისათვის საჭირო სითბო, ანუ თბოტევადობის* გამოსახლება მუდმივი მოცულობის პირობებში, ჯ/(მოლი·K).

იდელური აირის გაფართოების მუშაობა გამოისახება კლავირონის განტოლებით $p \cdot dV = R \cdot dT$. აქედან

$$dH = C_v dT + R dT = (C_v + R) \cdot dT = C_p \cdot dT. \quad (2.3)$$

სადაც C_p არის თბოტევადობა მუდმივი წნევის პირობებში; $R = 8,314$ ჯ/(მოლი·K) - აირების მუდმივა.

შიგა ენერჯია სისტემის მდგომარეობის მახასიათებელია და მისი ცვლილება არ არის დამოკიდებული პროცესის მსვლელობის გზაზე. სითბო და მუშაობა მხოლოდ პროცესის მსვლელობისას შედგენდება და წარმოადგენს ენერჯიის გადაცემის ფორმას და არა თვით ენერჯიას.

2.1.2 თერმოდინამიკის პირველი კანონი

მეტალურგიაში მიმდინარე პროცესების მეტი წილი ხორციელდება სითბოს გამოყოფით ან შთანთქმით. მაგალითად, კონვერტერში მიმდინარე პროცესი ხასიათდება სითბოს გამოყოფით. თხევადი ფოლადის უანგბადით გაქრევისას ფოლადის მინარეჟების (ნახშირბადი, კაუბადი, მანგანუმი და სხვ.) დაუანგეის შედეგად გამოიყოფა სითბო. გამოყოფილი სითბოს ნაწილი იხარჯება ლითონის გახურებაზე, ნაწილი – ამონაგის გახურებაზე, ხოლო დანარჩენი იფანტება გარე სივრცეში. გამოყოფილი და შთანთქმული სითბოს რაოდენობა ყველა შემთხვევაში ერთი და იგივე უნდა იყოს. ეს მაგალითი ადასტურებს თერმოდინამიკის პირველ კანონს, რომლის მიხედვით ერთი სახის ენერჯია მეორე სახის ენერჯიად გარდაქმნება ზუსტად ეკვივალენტური რაოდენობით. ამის საფუძველზე შესაძლებელია თერმოდინამიკის პირველი კანონის ასეთი ფორმულირება: იზოლირებული სისტემის ენერჯია უცვლელია.

თერმოდინამიკის პირველი კანონი შეიძლება გამოისახოს შემდეგი განტოლებით:

$$Q = H = \Delta U + A. \quad (2.4a)$$

აქედან ჩანს, რომ სისტემასთან მიყვანილი სითბო (Q) იხარჯება შინაგანი ენერჯიის (ΔU) ზრდასა და წინააღმდეგობის გადა-

* რედაქტორისაგან: ტერმინი „თბოტევადობა“ იგივეა, რაც „სითბოტევადობა“.

ლახვანზე, ე.ი. გარკვეული მუშაობის შესრულებაზე (A). იგივე დამოკიდებულება შეიძლება გამოისახოს დიფერენციალური სახით:

$$dQ=dH=dU+dA. \quad (2.4b)$$

თუ სისტემა თავად ასრულებს მუშაობას, მაშინ პირობითად მიღებულია, რომ ეს მუშაობა დადებითია (აირის გაფართოება), ხოლო თუკი მუშაობა სრულდება გარე ძალებით – უარყოფითია.

2.1.3. სითბური ეფექტი

ქიმიური თერმოდინამიკის ნაწილს, რომელიც ქიმიური რეაქციების, ფაზური გადასვლების და ა.შ. სითბურ ეფექტებს შეისწავლის, თერმოქიმია ეწოდება. სითბური ეფექტი ყველა ქიმიურ რეაქციას ახასიათებს. თუ ხორციელდება რაიმე ქიმიური რეაქცია, მაშინ მიღებულ ნივთიერებათა ენთალპიებსა ΣH_2 და საწყის ნივთიერებათა ენთალპიებს ΣH_1 შორის სხვაობა ერთი და იგივე ტემპერატურისათვის გამოსახავს რეაქციის სითბურ ეფექტს Q_p -ს (მუდმივი წნევის პირობებში).

იმ შემთხვევაში, როცა $\Sigma H_2 - \Sigma H_1 = \Delta H < 0$ სისტემის ენთალპიის ცვლილება უარყოფითი სიდიდეა, რეაქცია ხორციელდება სითბოს გამოყოფით (ეგზოთერმული პროცესი), ხოლო თუ კი $\Delta H > 0$, რეაქცია მიმდინარეობს სითბოს შთანქმით - Q_p (ენდოთერმული პროცესი). ამრიგად,

$$\begin{aligned} +Q_p &= -\Delta H, \\ -Q_p &= +\Delta H. \end{aligned} \quad (2.5)$$

სითბური ეფექტის ან ენთალპიის განსომილებაა ჯ/მოლი. ეს სიდიდეები თერმოდინამიკურ ცნობარებში ძირითადად ტაბულების სახითაა მოცემული სტანდარტული პირობებისათვის, $T=298 \text{ K}$ (25°C), $p=1$ ატმ (0,1 მპა). სტანდარტული პირობებისთვის ტაბულების სახითაა აგრეთვე სხვა თერმოდინამიკური მახასიათებლებიც: ენტროპია, თბოტევადობა და გიბსის* ენერჯია. ამ პირობებისათვის ეს სიდიდეები აღინიშნება შემდეგნაირად: Q_{298}° , H_{298}° , ΔH_{298}° , S_{298}° , ΔS_{298}° , C_{298}° , ΔC_{298}° და ა.შ. 2.1. ცხრილში მოყვანილია ზოგიერთი ნაერთის მარტივი ნივთიერებიდან წარმოქმნის სტანდარტული ენთალპიები და სტანდარტული ენტროპიები; აგრეგატული გარდაქმნის ტემპერატურები და ენთალპიები [4].

საინტერესოა ნახშირბადის წვის მაგალითის განხილვა



* რეაქტორისაგან: „გიბსის“ იგივეა რაც „ჯიბსის“.

ეს თერმოქიმიური განტოლება შეიცავს დიდ ინფორმაციას. ირკვევა, რომ ერთი მოლი ნახშირბადის დაწვით. ე.ი. ერთი მოლი ნახშირორჟანგის წარმოქმნისას გამოიყოფა 393500 ჯ სითბო. რაც მოუთხოვს, რომ საწყის ნივთიერებებს, ნახშირბადს და ჟანგბადს. გაცილებით მეტი ენერჯიის მარაგი გააჩნია. ვიდრე საბოლოო პროდუქტს - ნახშირორჟანგს. ეს სხვაობა გამოისახება გამოყოფილი სითბოთი, რომელიც იანგარიშება შემდეგი განტოლებიდან:

$$H_{CO_2}^0 - H_{C}^0 - H_{O_2}^0 = \Delta H^0 = -393500. \quad (2.6)$$

რეაქციაში მითითებულია მორეაგირე ნივთიერებათა აგრეგატული მდგომარეობა (მყ-მყარი, თხ-თხევადი, ა-აირი, ხსნ-ხსნარი). ეს აუცილებელია, ვინაიდან ენთალპიის ანუ ნივთიერების ენერჯიის მარაგი დამოკიდებულია მის ფიზიკურ მდგომარეობაზე. თუკი რეაქციაში მყარი ნახშირბადის მაგიერად მონაწილეობას მიიღებდა აირადი ნახშირბადი, რომლის ენერჯიის მარაგი გაცილებით მეტია, მაშინ გამოიყოფოდა სითბოს მეტი რაოდენობა. გამოყოფილი სითბოს ეს ნამატი ტოლია სითბოს იმ რაოდენობისა, რომელიც დაიხარჯებოდა მყარი ნახშირბადის ასაორთქლებლად. ზემოთ მოყვანილი ენთალპიის მნიშვნელობა ნაგულისხმებია ერთი მოლი ნივთიერებისათვის.

რეაქციის სითბური ეფექტი რომელიმე ტემპერატურისათვის ΔH_{T_2} განისაზღვრება ფიზიკური ქიმიიდან ცნობილი კირხოფის განტოლებით [1]:

$$\Delta H_{T_2} = \Delta H_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p \cdot dT \quad (2.7)$$

ე.ი. რომელიმე T_2 ტემპერატურისათვის რეაქციის სითბური ეფექტის განსაზღვრისათვის აუცილებლად ცნობილი უნდა იყოს სითბური ეფექტის მნიშვნელობა სხვა რომელიმე T_1 ტემპერატურისათვის (მაგალითად, სტანდარტულისათვის) და რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებათა თბოტევადობების ტემპერატურული დამოკიდებულებები T_1, \dots, T_2 შუალედში. ეს უკანასკნელი გამოისახება ემპირიული ფორმულით

$$C_p = a + bT + cT^2. \quad (2.8)$$

a, b, c კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობები მოცემულია სპეციალურ თერმოდინამიკურ ცხრილებში [3].

გ. შესმა აღმოაჩინა თერმოქიმიის ძირითადი კანონი. ამ კანონის თანახმად რეაქციის სითბური ეფექტი არაა დამოკიდებული რეაქციის მსვლელობის გზაზე (შუალედურ სტადიაზე) და განისაზღვრება მხოლოდ საწყის ნივთიერებათა და რეაქციის პროდუქტთა თვისებითა და მდგომარეობით. შესის კანონი წარმოადგენს თერმო-

სოციალური ნივთიერების წარმოქმნის სტანდარტული ენთალპია და ქიურისია: გარდაქმნის ენთალპია და ტემპერატურა

ნივთიერება	- ΔH° კჯ/მოლი	S° ჯ/მოლი·K	t გარდ- °C	L გარდ- კჯ/მოლი	t ღნობ, °C	L ღნობ, კჯ/მოლი	t ღვლ. °C	L აორთქ, კჯ/მოლი	შენიშვნა
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Al	0	28,3	-	-	659	10,45	2450	290,51	
Al ₂ O ₃	1672,0	51,16	-	-	2050	107,43	-	-	
Al ₂ S ₃	722,05	89,87	-	-	1100	-	-	-	
B ₂ (გრძობა)	0	5,85	-	-	2180	21,70	-	-	
B ₂ O ₃ (ამორფ)	1258,10	79,34	-	-	450	22,15	(1500)	-	
C ₁ (გრაფიტი)	0	5,73	-	-	3800	104,5	-	-	
CH ₄ (g)	74,78	92,38	-	-	-	-	-	-	
CO ₂ (g)	110,44	190,71	-	-	-	-	-	-	
CO ₂ (s)	393,13	213,43	-	-	-	-	-	-	
Ca	0	41,59	464	0,25	843	8,26	1483	150,48	
CaF ₂	1213,45	68,76	1151	4,77	1418	29,68	2510	311,83	
CaCl ₂	790,0	113,70	-	-	772	28,42	(2000)	-	
CaO	634,52	40,25	-	-	2615	(79,42)	-	-	
Ca ₃ (PO ₄) ₂	670,90	233,08	1100	15,67	-	-	-	-	დანამუდებებიდან
CaS	477,77	57,10	-	-	-	-	-	-	
CaSO ₄	1431,23	106,60	1193	-	-	28,0	-	-	
Ca ₃ N ₂	439,0	107,22	-	-	-	-	-	-	
CaC ₂	58,94	69,85	447	5,56	2300	-	-	-	
CaCO ₃	177,65	92,80	50	0,19	ღაშლა	-	-	-	
Ca ₂ Al ₂ O ₄	15,47	114,11	-	-	-	-	-	-	დანამუდებებიდან

(ბრილი 2.1 (გაერთიანებული))

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CaSiO ₃	89,87	81,93	1190	(5,43)	1540	(56,01)	-	-	თანგეოლოგიდან
Ca ₂ SiO ₄	126,24	127,49	675; 1420	4,43; 2,26	2130	-	-	-	თანგეოლოგიდან
Ce	0	69,56	725	2,93	795	5,23	(3470)	-	
CeO ₂	1024,1	64,08	-	-	-	-	-	-	
CeS	493,24	100,78	-	-	-	-	-	-	
CeN	326,04	60,02	-	-	-	-	-	-	
Cr	0	23,74	-	-	1857	20,9	2690	341,50	
Cr ₂ O ₃	1140,0	81,34	-	-	-	-	-	-	
CrN	117,88	-	-	-	-	-	-	-	
Cu	0	33,31	-	-	1083	12,96	-	-	
Cu ₂ O	174,72	93,80	-	-	1236	56,76	-	-	
Cu ₂ S	81,51	117,46	103; 350	3,85; 0,84	1130	10,87	-	-	
F ₂ (g)	0	202,52	-	-	-	-	-	-	
Cl ₂ (g)	0	222,79	-	-	-101	6,4	-34,1	20,40	
Fe	0	27,13	(760)914; 1391	5,1; 0,67; 0,84	1536	13,75	-	-	
FeCl ₂	340,67	119,97	-	-	677	43,05	-	-	
Fe ₃ O ₄	265,43	57,39	-	-	1378	30,93	-	-	
Fe ₂ O ₃	1115,22	146,30	-	-	1597	137,94	-	-	
Fe ₂ O ₂	820,12	89,50	(680)(780)	0,67	1594	-	-	-	
FeS	93,63	68,43	138; 325	2,38; 0,5	1195	23,31	-	-	
H ₂ (g)	0	130,46	-	-	-	-	-	-	
H ₂ S(g)	20,06	250,24	-170; -147	1,55; 0,46	-85,5	2,45	-	-	
La	0	56,85	868	2,84	920	9,61	3420	401,70	
La ₂ O ₃	1791,13	116,62	-	-	-	-	-	-	
La ₂ S ₃	1236,03	169,50	-	-	-	-	-	-	

ცხრილი 2.1 (გაგრძელება)

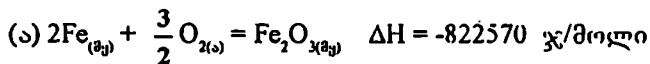
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mg	0	32,65	-	-	472	44,31	1105	127,49	
MgO	601,1	26,80	-	-	2825	77,33	-	-	
MgS	352,08	51,96	-	-	-	-	-	-	
MgSiO ₃	24,66	67,72	630; 985	0,67; 1,63	1577	75,24	-	-	ქანაგულბიდას
Mn	0	31,98	720; 1090; 1136	2,25; 2,21; 1,8	1244	14,63	2060	220,29	
MnO	384,77	60,07	-	-	1875	53,34	-	-	
Mn ₂ O ₄	1385,25	148,40	1172	20,9	1560	-	-	-	
MnS	203,78	77,62	-	-	1530	26,13	-	-	
MnSiO ₄	24,66	89,03	-	-	1345	89,54	-	-	ქანაგულბიდას
Mo	0	28,55	-	-	2620	35,53	4650	220,3	
MoO ₂	588,54	46,23	-	-	-	-	-	-	
N ₂ (g)	0	191,32	-237,5	0,23	-210	0,72	-196	5,57	
Nb	0	36,49	-	-	2468	29,26	-	-	
NbO	407,55	48,07	-	-	-	-	-	-	
Ni	0	29,85	358	0,59	1455	17,14	2920	374,53	
NiO	239,51	38,46	-	-	-	-	-	-	
NiS	90,62	54,05	-	-	-	-	-	-	
O ₂ (g)	0	204,82	-250	0,09; 0,74	-219	0,44	-183	6,81	
S _(ლ-მზ)	0	31,85	95,5	0,40	119	1,67	444,6	-	
S _(g)	-237,84	167,58	-	-	-	-	-	-	
SO ₂ (g)	269,2	247,67	-	-	-75,5	7,4	-70,94	247,87	
Si	0	18,94	-	-	1410	50,58	3280	388,89	
SiO ₂ (g)	-	211,09	-	-	-	-	-	-	
SiO ₂ (ლ-მზ)	908,31	42,89	574; 806	0,73; 2,51	1722	10,87	-	-	
Tl	0	30,64	882	3,34	1667	14,63	3285	425,11	

ცხრილი 2.1 (დასასრულებელი)

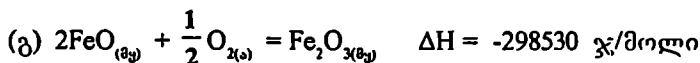
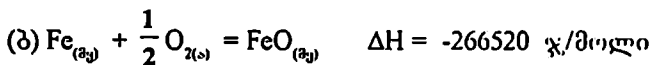
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TiO	518,95	34,90	991	3,43	2020	58,52	-	-	
TiO ₂	943,64	50,41	-	-	1870	66,88	-	-	
TiN	336,36	30,22	-	-	-	-	-	-	
TiC	183,29	24,45	-	-	-	-	-	-	
V	0	29,30	-	-	1902	16,72	(3350)	-	
V ₂ O ₄	1237,28	99,44	-	-	-	-	-	-	
VC	83,6	35,03	-	-	-	-	-	8	
W	0	33,61	-	-	3410	35,11	(5500)	823,46	
WO ₂	589,17	50,49	-	-	-	-	-	-	
Zr	0	38,83	852	3,76	1857	19,23	4400	-	
ZrO ₂	1093,07	50,87	1175	5,94	2680	86,94	-	-	

დინამიკის 1 კანონის შედეგს და იგი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ამ კანონის კიდევ ერთი ფორმულირება. განვიხილოთ ჰესის კანონის დამადასტურებელი მაგალითი.

რკინის დაჟანგვისას შეიძლება უშუალოდ წარმოიქმნას რკინის უმაღლესი ოქსიდი



იგივე რეაქცია შეიძლება მიმდინარეობდეს სტადიებად:



თერმოქიმიური გამოთვლებისას შესაძლებელია თერმოქიმიურ განტოლებათა ისეთივე გარდაქმნა, როგორც ალგებრული განტოლებებისა. გავამრავლოთ (ბ) განტოლება 2-ზე და შეეკრიბოთ (ბ) და (გ) განტოლებები. საბოლოოდ მიიღება (ა) განტოლების ადეკვატური განტოლება. იგივე სიტბური ეფექტით - 822570 ჯ/მოლი.

ჰესის კონონიდან გამომდინარეობს მეტად მნიშვნელოვანი შედეგები:

1. ნაერთის გარკვეულ პროდუქტებად დაშლის სიტბო უდრის ამ პროდუქტებიდან იმავე ნაერთის წარმოქმნის სიტბოს შებრუნებელი ნიშნით;

2. საწყისი ნივთიერებებიდან ნაერთის წარმოქმნის სიტბო არაა დამოკიდებული ამ ნაერთების მიღების გზაზე;

3. რეაქციის სიტბური ეფექტი, მიღებული და საწყისი ნივთიერებების დაწვის სიტბოთა სხვაობის ტოლია;

4. რეაქციის სიტბური ეფექტი, მიღებული და საწყისი ნაერთების მარტივი ნივთიერებებიდან წარმოქმნის სიტბოთა სხვაობის ტოლია.

2.1.4 თერმოდინამიკის მეორე კანონი

თერმოდინამიკის პირველი კანონის საფუძველზე შესაძლებელია სხვადასხვა პროცესის, მათ შორის ქიმიურის, ენერგეტიკული ბალანსის დადგენა. მაგრამ ეს კანონი ვერ განსაზღვრავს თავისთავად მიმდინარე პროცესების მიმართულებას. ბუნებაში პროცესებს განსაკუთრებული (უპირატესი) მიმართულება გააჩნიათ.

სისტემა მიისწრაფვის რაღაც მდგომარეობისაკენ. რომელშიც მისი შემდგომი ცვლილებების უნარი ამოწურულია. ე.ი. სისტემა მიისწრაფვის წონასწორული მდგომარეობისაკენ. და როცა იგი მიიღწევა, პროცესი შეწყდება. ასეთი პროცესები თავისთავად მიმდინარე პროცესებია. ასე მაგალითად, წყლის ვარდნა ზევიდან ქვევით, სითბოს გადაცემა ცხელი სხეულიდან ცივ სხეულზე, აირის თავისთავადი გაფართოება და სხვ. არ არის გამორიცხული დავარდვიოთ წონასწორობა და პროცესი წავეყვანოთ საწინააღმდეგო მიმართულებით, მაგალითად, სითბო შეიძლება ცივი სხეულიდან გადაეცეს ცხელს. ამ პროცესის განხორციელება შესაძლებელია, თუმცა იგი მოითხოვს გარკვეული მუშაობის შესრულებას (მაცივარი, კონდიციონერი და სხვა).

ბუნებაში მიმდინარე ყველა პროცესი პრაქტიკულად შეუქცევადია, მაგრამ ფიზიკურ ქიმიაში ყოველთვის სარგებლობენ შექცევადი პროცესის ცნებით, რაც ძლიერ მოსახერხებელია. ასეთი პროცესის განხორციელებისათვის ნაგარაუდევია იდეალური პირობები, როცა პროცესი მიმდინარეობს ხახუნის გარეშე უმნიშვნელო სიჩქარით და სხვ. როგორც ზემოთ აღინიშნა, სისტემა ყოველთვის მიახლოებულია წონასწორულთან. შეუქცევადი პროცესი შეუძლებელია წარიმართოს შექცევადად. ვინაიდან პროცესის შედეგად შინაგანი ენერჯიის გადანაწილება სხეულში ვერ ასწრებს ხუსტ თანხვდენას გარემო პირობების ცვლილებასთან. რაც, თავის მხრივ, იწვევს თბური წონასწორობის დარღვევას.

ბუნებაში მიმდინარე შეუქცევადი პროცესების შესასწავლად აუცილებელია შეუქცევადობის საზომის პოვნა. ნებისმიერ სისტემაში რაიმე პროცესის შედეგად დამყარებული წონასწორული მდგომარეობის აღბათობა უფრო მეტია, ვიდრე ამავე სისტემის მანამდე არსებული მდგომარეობის აღბათობა. მაგალითად, ორი სხვადასხვა აირის შერევით მიღწეული კონცენტრაციის გათანაბრების ანუ სისტემის ერთგვაროვნობის აღბათობა მეტია, ვიდრე ამ აირების განცალკევების აღბათობა. იზოლირებული სისტემა მეტი აღბათობის მდგომარეობიდან ნაკლები აღბათობის მდგომარეობაში თავისთავად ვერ გადავა. სისტემის მდგომარეობის აღბათობის საზომ ფუნქციას წარმოადგენს ენტროპია. ამ ფუნქციის საშუალებით შესაძლებელია პროცესის მიმართულების განსაზღვრა.

სხეულზე გადაცემული სითბოს ფარდობას აბსოლუტურ ტემპერატურასთან, მიყვანილი სითბო ეწოდება dQ/T . თუ სხეული შექცევადი პროცესით გადადის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში, მაშინ მიყვანილ სითბოთა ჯამი შეიძლება გამოისახოს ინტეგრალის საშუალებით $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$, რომელიც ენტროპიის ცვლილებას წარ-

მოადგენს. ეს ინტეგრალი არაა დამოკიდებული პროცესის გზაზე. იგი მხოლოდ სისტემის საწყისი და საბოლოო მდგომარეობით განისაზღვრება. ამრიგად, dQ/T წარმოადგენს რალაც ფუნქციის, დაუშვათ S -ის, სრულ დიფერენციალს და მას ენტროპია ეწოდება.

$$\text{შექცევადი პროცესისათვის} \quad dS = \frac{dQ}{T}, \quad (2.9)$$

$$\text{შეუქცევადი პროცესისათვის} \quad dS > \frac{dQ}{T}, \quad (2.10)$$

$$\text{საერთო სახით:} \quad dS \geq \frac{dQ}{T}. \quad (2.11)$$

(2.11)-ე განტოლება წარმოადგენს თერმოდინამიკის მეორე კანონის მათემატიკურ გამოსახულებას. აქედან შეიძლება ჩამოყალიბდეს ამ კანონის შემდეგნაირი ფორმულირება:

იზოლირებულ სისტემაში თავისთავად მიმდინარე პროცესებისათვის ენტროპია იზრდება (შეუქცევადი პროცესი) ან რჩება უცვლელი (შექცევადი პროცესი), მაგრამ გამორიცხულია მისი შემცირება.

აქვე მოგვყავს თერმოდინამიკის მეორე კანონის სხვანაირი ფორმულირება, რომელიც ცნობილია კლაუსის პრინციპის სახელით.

სითბო თავისთავად, მუშაობის შესრულების გარეშე, ვერ გადავა ნაკლებად ცხელი სხეულიდან მეტად ცხელ სხეულზე. „სამყაროს ენერჯია უცვლელია, სამყაროს ენერჯია მაქსიმუმისაკენ მიისწრაფვის“.

თერმოდინამიკის მეორე კანონი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ, შესაძლებელია თუ არა მოცემულ პირობებში იზოლირებულ სისტემაში განხორციელდეს რომელიმე რეაქცია საჭირო მიმართულებით. ამისათვის საკმარისია გავიანგარიშოთ ენტროპიის ცვლილება. თუ $dS > 0$, მაშინ შესაძლებელია პროცესის განხორციელება.

ენტროპიის განზომილებაა $\text{ჯ}/(\text{მოლი}\cdot\text{K})$. ქვემოთ მოგვყავს ენტროპიის ცვლილების (ΔS) განსაზღვრის რამდენიმე მაგალითი. (ყველა პროცესს ვიხილავთ, როგორც შექცევადს).

1. განვიხილოთ იზოთერმული პროცესი ($T = \text{const}$). ა) რას უდრის 0°C -ზე ერთი მოლი ყინულის დნობისას ენტროპიის ცვლილება (ΔS). ყინულის დნობის მოლური სითბო ამ ტემპერატურაზეა $6000 \text{ ჯ}/\text{მოლი}$ (ცხრ. 2.1).

$$\Delta S = \frac{L_{\text{დნ}}}{T} = \frac{6000}{273} = 21,99 \text{ ჯ}/(\text{მოლი}\cdot\text{K}).$$

ბ) რას უდრის 1539 °C-ზე ერთი მოლი რკინის დნობის ენტროპიის ცვლილება. რკინის მოლური დნობის სითბო ამ ტემპერატურაზეა 17520 ჯ/მოლი.

$$\Delta S = \frac{17520}{1812} = 9,7 \text{ ჯ}/(\text{მოლი}\cdot\text{K}).$$

2. თუ პროცესი არაა იზოთერმული, მაშინ გასათვალისწინებელია ენტროპიის ცვლილება გამოწვეული ტემპერატურის შექცევადი ცვლილებით. ამისათვის ვიყენებთ შემდეგ განტოლებას:

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p \cdot dT}{T}. \quad (2.12)$$

თუ დავეუშვებთ, რომ C_p არაა დამოკიდებული ტემპერატურის ცვლილებაზე და $P = \text{const}$, მაშინ სისტემის გათბობის შედეგად

$$\Delta S = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 2,3 \cdot C_p \cdot \lg \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.13)$$

ა) გამოვიანგარიშოთ მუდმივ წნევაზე 0 °C-დან 30 °C-მდე გათბობისას ერთი მოლი ვერცხლის ენტროპიის ცვლილება. $C_p = 25,48$ ჯ/(მოლი·K) (იხილეთ [2]) და მისი ცვლილება არაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

$$\Delta S = 2,303 \cdot 25,48 \lg \frac{303}{273} = 2,65 \text{ ჯ}/(\text{მოლი}\cdot\text{K}).$$

ენტროპიის სრული ცვლილება იმ ტემპერატურული შუალედი-სათვის (T_1, \dots, T_2), რომელშიც ნივთიერება ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან გადადის მეორეში (გადნობა, აორთქლება და სხვ.), განისაზღვრება განტოლებით:

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p \cdot dT}{T} + \frac{L_{\text{გაღ}}}{T_{\text{გაღ}}} + \int_{T_{\text{აორთ}}}^{T_2} \frac{C_p^I \cdot dT}{T} + \frac{L_{\text{აორთქ}}}{T_{\text{აორთქ}}} + \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^{II} \cdot dT}{T}, \quad (2.14)$$

სადაც C_p^I გამდნარი ნივთიერების თბოტეკადობაა;
 C_p^{II} ორთქლის თბოტეკადობა.

2.1.5 ქიმიური რეაქციის გიბსის ენერჯია

ფიზიკურ ქიმიასა და მეტალურგიული პროცესების თეორიაში ტემპერატურისა და წნევის მუდმივობისას მიმდინარე პროცესების წონასწორობის პირობების შესასწავლად მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება H-TS ფუნქციას, რომელსაც გიბსის ენერჯია ეწოდება:

იგი G სიმბოლოთი აღინიშნება (ადრე ეს ფუნქცია იზობარულ-იზოთერმული პოტენციალის ან თავისუფალი ენერჯიის სახელწოდებით იყო ცნობილი)

$$G = H - TS; \Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (2.15)$$

TS , რომელიც წარმოადგენს სხვაობას ენთალპიასა და გიბსის ენერჯიებს შორის. ფიზიკურ ქიმილაში მიღებულია ბმული ენერჯიის სახომად. იზობარულ-იზოთერმულ პირობებში შეუძლებელია იგი ვაქციოთ მუშაობად. ამრიგად, ენთალპია წარმოადგენს თავისუფალი (გიბსის) და ბმული ენერჯიების ჯამს.

ქიმიკურის ზრდასთან ერთად სისტემის კინეტიკური ენერჯიის ზრდის ხარჯზე მატულობს ენთალპიის სიდიდე, მაგრამ ამავე დროს უფრო სწრაფად მატულობს ბმული ენერჯიის TS -ს მნიშვნელობა და საერთო ჯამში გიბსის ენერჯია კლებულობს. აბსოლუტურ ნულზე (0 K) სისტემის ენერჯია მხოლოდ თავისუფალი ენერჯიისგან შედგება, ე.ი. $H=G$.

თუ ენტროპიის საშუალებით შესაძლებელია პროცესის მიმართულების განსაზღვრა მხოლოდ იზოლირებული სისტემისათვის, გიბსის ენერჯია მუდმივი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში საშუალებას იძლევა განისაზღვროს პროცესის მიმართულება არაიზოლირებული სისტემისთვისაც. თავისთავად მიმდინარე პროცესებში ($T, p = \text{const}$) სისტემის გიბსის ენერჯიის სიდიდე ყოველთვის კლებულობს და მინიმუმს წონასწორობის დამყარების მომენტში აღწევს. წონასწორობის პირობებში $dG=0$.

ზოგადად, ბუნებაში მიმდინარე ყველა პროცესისათვის

$$dG = 0. \quad (2.16)$$

ამრიგად, მეტალურგიულ პროცესებში მიმდინარე ქიმიური რეაქციების ძირითად თერმოდინამიკურ მახასიათებელს გიბსის ენერჯია წარმოადგენს. ანგარიშებში ძირითადად სარგებლობენ G -ს არა აბსოლუტური მნიშვნელობით, არამედ მისი ცვლილებით ΔG . ამავე დროს, რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებებს, როგორც საწყის, ასევე საბოლოო პროდუქტებს, აიღებენ სტანდარტულ მდგომარეობაში. თუკი სუფთა ნივთიერება 1 ატმ* წნევისას წარმოადგენილია იმ აგრეგატულ მდგომარეობაში, რომელიც სტანდარტული მოცემული პირობებისათვის, მაშინ ამბობენ, რომ ეს ნივთიერება სტანდარტულ მდგომარეობაშია. მაგალითად სპილენძისათვის 1000 K -ზე სტანდარტულია $\text{Cu}_{(g)}$, ხოლო 1400 K -ზე – $\text{Cu}_{(ლ)}$, სტანდარტული პირობების გათვალისწინებით გამოთვლილ ΔG -ს ეძახიან ქიმიური რეაქციის გიბსის სტანდარტულ ენერჯიას და იგი აღინიშნება

* ამ შემთხვევაში საერთოდ ირჩევენ არასისტემურ ერთეულს 1 ატმ = 101325 პა , ვინაიდან წნევის სხვა სტანდარტულ ერთეულზე (მაგალითად, 1 პა) გადასვლა მოითხოვდა არსებული ცნობარების ვადამუშავეებს.

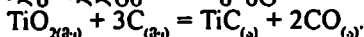
ΔG° -ით. აქედან გამოიმდინარე, ქიმიური რეაქციის განტოლების დაწერისას, აუცილებლად მითითებული უნდა იყოს მორეაგირე ნივთიერებათა სტანდარტული მდგომარეობები. რაც შეეხება სტანდარტული მდგომარეობის შერჩევას, ამასე ქვემოთ გვეჩვენა საუბარი.

ქიმიური რეაქციის ΔG° სიდიდის განსაზღვრისათვის აუცილებელია რეაქციის პროდუქტების წარმოქმნის გიბსის ენერგიების ჯამის გამოთვლა (სტეკიომეტრიული კოეფიციენტების გათვალისწინებით) და მას უნდა გამოაკლდეს საწყისი ნივთიერებების წარმოქმნის გიბსის ენერგიების ჯამი. ზოგიერთ ცნობარში მოყვანილია ელემენტებიდან ნივთიერებათა წარმოქმნის სტანდარტული ენთალპიების (ΔH°) და ენტროპიების (ΔS°) მნიშვნელობები. ამ შემთხვევაში ΔG° -ის გამოსათვლელად იყენებენ განტოლებას

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ. \quad (2.17)$$

ხშირად პრაქტიკაში, გარკვეული ტემპერატურული ინტერვალისათვის მხედველობაში არ იღებენ რეაქციის ტემპერატურით გამოწვეულ ΔH° და ΔS° ცვლილებებს, ვინაიდან ისინი საკმაოდ მცირეა. ამ დროს (ΔG°)-ს ტემპერატურული დამოკიდებულება გამოიხატება (2.17) განტოლებით. იმ ნაერთების წარმოქმნის გიბსის სტანდარტული ენერგიების მნიშვნელობები, რომელნიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ფოლადსადნობ წარმოებაში, მოყვანილია ცხრილში 2.2 (2.17) განტოლების შესაბამისი კოეფიციენტების სახით. ამ კოეფიციენტების მნიშვნელობები მოცემულ ტემპერატურულ შუალედში მიჩნეულია მუდმივ სიდიდეებად. უფრო ზუსტი ანგარიშებისათვის აუცილებელია ΔH° -ისა და ΔS° -ის ტემპერატურისგან დამოკიდებულების მხედველობაში მიღება. მაგრამ პრაქტიკულ ანგარიშებში ეს არ წარმოადგენს აუცილებლობას.

მაგალითი. განესაზღვროთ გრაფიტით ტიტანის დიოქსიდის ტიტანის კარბილამდე აღდგენის რეაქციის ΔG° .



თუ ვისარგებლებთ ცხრილით 2.2, რომელშიც მოყვანილია რეაქციაში მონაწილე ყველა ნივთიერების წარმოქმნის ΔG° და შევაჯამებთ მათ აღგებრულად, მივიღებთ

$$\Delta G^\circ = 2\Delta G^\circ_{\text{CO}} + \Delta G^\circ_{\text{TiC}} - \Delta G^\circ_{\text{TiO}_2} = [2 \cdot (-118000 - 83,77T) + (-179000 + 15T) - (-936000 + 176T)] = 521000 - 328,54T, \text{ ჯოული.}$$

2.1.6 რეაქციის წონასწორობის მუდმივა

რეაქციაში მონაწილე (აღებული და მიღებული) აირების პარციალური წნევები ერთმანეთთან დაკავშირებულია განსაზ-

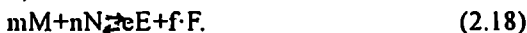
ელემენტებიდან ზოგიერთი ნიუთონების წარმოქმნის გიბსის სტანდარტული ენერჯიები ($\Delta G^\circ = A + BT$, ჯ/მოლი) ფოლადსადნობი პროცესების ტემპერატურებისათვის (1800-2000 K)

ნაერთები	A	B	ნაერთები	A	B
1	2	3	4	5	6
ქ ა რ ბ ი დ ე ბ ი					
Al_4C_3	-258000	97	Mn_7C_3	-66100	-58
B_3C	-69500	9	Mo_2C	66100	-110
CaC_2	-213000	61	MoC	40600	-59
$Cr_{73}C_6$	-380860	-37	SiC	-123000	38
Cr_7C_3	-168000	-30	Ta_7C	-142300	5.5
Cr_3C_2	-84400	-15	TaC	-161000	5.5
$C_2H_2(ა)$	220000	-50	TiC	-179000	15
$CH_4(ა)$	-88400	108,5	ZrC	-200000	12
MgC_2	-49800	102			
ნ ი ტ რ ი დ ე ბ ი					
AlN	-330000	117	$Mg_3N_2(ა)$	-855000	504
BN	-248000	86	Mo_2N	-71550	58
Be_3N_2	-604000	196	Si_3N_4	-922000	457
$Ca_3N_2(ა)$	-918400	490	TaN	-234700	79
CcN	-336800	114	TiN	-334500	93
Cr_7N_3	-115000	64	VN	-207500	78
CrN	-113600	73	ZrN	-360200	90
$NH_3(ა)$	-55800	117,6			
NbN	-235600	91			
ქ ა ნ ბ ე უ ლ ე ბ ი					
$Al_2O_3(ა)$	-195000	-44	Cc_2O_3	-1826300	337
$AlO(ა)$	41000	-58,10	CcO_2	-1029000	214
$AlO_2(ა)$	-108000	4	$CoO(ა)$	-249700	80
$Al_2O_3(ა)$	-1681000	324	Cr_2O_3	-1131000	250
B_2O_3	-1220000	204	$CuO(ა)$	-1132000	58,3
BaO	-555000	101	$Cu_2O(ა)$	-136600	48,5
$BeO(ა)$	-619000	104	$FeO(ა)$	-245000	53
$CO(ა)$	-118000	-83,77	Fe_2O_3	-743000	210
$CO_2(ა)$	-397000	0,2	Fe_3O_4	-992000	247
CaO	-790000	194			
$CaO(ა)$	-134000	38,4			
$H_2O(ა)$	-251070	57,65	$SnO_2(ა)$	-560000	197
La_2O_3	-1784000	278	Ta_2O_5	-1984000	390
MgO	-729000	204	$TiO(ა)$	-527000	84
$MgO(ა)$	-99000	23,9	$TiO_2(ა)$	28500	-77
MnO	-408400	90	TiO_2	-936000	176
Mn_2O_3	-982000	269	$TiO_2(ა)$	-344000	3
$Mn_3O_4(ა)$	-1790000	652	$Ti_2O_3(ა)$	-1481000	246

1	2	3	4	5	6
MoO ₂	-557000	156	Ti ₂ O _{3(მ)}	-2410000	410
MoO _{2(ა)}	-30000	-24	VO	-406000	73
MoO _{3(ა)}	-370000	65	VO _(ა)	131000	-80
NO _(ა)	91500	-12,72	V ₂ O ₃	-1186000	233
NO _{2(ა)}	35600	61,5	V ₂ O _{3(მზ)}	-1263000	234
Na ₂ O	-531000	250	VO _{2(ა)}	-251000	-8,3
NbO _(ა)	196000	-84	V ₂ O ₃	-1441000	323
Nb ₂ O _{3(მზ)}	-1744000	340	WO _(ა)	387000	-93
NiO	-249800	92	WO _{2(ა)}	20000	-22
PO _(ა)	-99600	-11,51	WO _{3(მზ)}	-731000	180
P ₂ O _{3(ა)}	-1235000	331	WO _{3(ა)}	-323000	61
P ₂ O ₅	-3112000	983	V ₂ O ₃	-1920000	292
SiO _(ა)	-162000	-48,3	ZrO _(ა)	72000	-77,3
SiO _{2(მ)}	-947000	198	ZrO _{2(ა)}	-339000	2
SnO	-241000	70	ZrO ₂	-1081000	176
ს უ ლ უ ი დ ე ბ ი					
Al ₂ S ₃	-752000	212	MnS	-276000	63
BaS	-527000	110	MoS ₂	-386060	173
CS _(ა)	208500	-86,05	Na ₂ S	-555400	240
CS _(ა)	-12300	-5,6	Ni ₃ S ₂	-264300	77
COS _(ა)	-204400	8,9	SiS _(ა)	-20000	-47,1
CaS	-691900	190	SiS _{2(ა)}	-177000	27
CuS _(900 K)	-113100	82	SnS _(ა)	24000	-45,68
FeS _(მზ)	-135000	43,2	SO _(ა)	-60000	-4,8
HS _(ა)	75000	-15	SO _{2(ა)}	-361000	72,9
H ₂ S _(ა)	-90500	-49,2	SO _{3(ა)}	-455100	163
MgS	-535000	187			
ფ ლ ო რ ი დ ე ბ ი					
AlF ₃	-1230000	80	PF ₃	-1646000	300
BaF ₄	-1450000	103	PbF ₂	-447000	-0,1
CaF _{2(მზ)}	-1310000	210	SF ₆	-48200	-12
CaF ₂	-970000	84	SiF ₄	-1665000	170
FeF	-120000	-78	SnF ₂	-500000	2
FeF ₂	-473200	-13	SnF ₄	-1088600	149
MnF	-140000	-63	TiF ₃	-1164000	45
MnF ₂	-592000	0,5	TiF ₄	-1566600	134
MnF ₃	-800000	54	ZrF	49600	-87
NaF	-405000	40	ZrF ₄	-1677500	128
ქ ლ ო რ ი დ ე ბ ი					
AlCl ₃	-603000	68	PbCl	-11000	-59
BCl ₃	-407000	52	PbCl ₂	-262000	285
CaCl _{2(მზ)}	-893000	190	PbCl ₄	-705000	155

1	2	3	4	5	6
$\text{FeCl}_3(\text{მხ})$	-306600	83	SiCl_4	-351000	130
MnCl	-39000	-66	SnCl_2	-220000	-3
MnCl_2	-305000	-6	TiCl_4	-768500	125
$\text{NaCl}(\text{მხ})$	-453000	130	WCl	748400	-213
NbCl_5	-688000	17	ZrCl_4	-870700	116
PbCl_2	-418100	266			

ღვრული განტოლებით, რომელიც წარმოადგენს მოქმედ მასათა კანონის გამოსახულებას. მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირად ფაზაში მიმდინარე პოზოგენური რეაქციისათვის (ერთ ფაზაში მიმდინარე რეაქცია)



მოქმედ მასათა კანონი გამოსახება წილადით

$$K_p = \frac{P_E^p \cdot P_F^f}{P_M^m \cdot P_N^n}, \quad (2.19)$$

რომლის მრიცხველი რეაქციის შედეგად მიღებულ ნივთიერებათა პარციალური წნევების ნამრავლია, ხოლო მნიშვნელი - საწყის ნივთიერებათა პარციალური წნევების ნამრავლი. პარციალური წნევების ხარისხის მაჩვენებლები ქიმიური რეაქციის განტოლების შესაბამისი სტექიომეტრიული კოეფიციენტების ტოლია. წონასწორობისას ეს წილადი მუდმივია და მას წონასწორობის K_p მუდმივა ეწოდება.

(2.19) განტოლებიდან ჩანს, რომ K_p სიდიდე წონასწორობის რაოდენობრივ მახასიათებელს წარმოადგენს. თუ K_p დიდი, რეაქციის პროდუქტთა პარციალური წნევები მეტია საწყისი ნივთიერების პარციალურ წნევებზე და წონასწორობა წანაცვლებულია პროდუქტების მიღებისაკენ და პირიქით. რეალური აირებისათვის (2.19) განტოლებაში პარციალური წნევების ნაცვლად ფუგითივობები უნდა შევიტანოთ. მაშინ წონასწორობის მუდმივა

$$K_f = \frac{f_E^p \cdot f_F^f}{f_M^m \cdot f_N^n}. \quad (2.20)$$

წონასწორობის მუდმივა შეიძლება გამოსახოს აგრეთვე კონცენტრაციების საშუალებით

$$K_c = \frac{C_E^p \cdot C_F^f}{C_M^m \cdot C_N^n}. \quad (2.21)$$

K_p და K_c სიდიდეებს შორის არსებობს კავშირი. გამომდინარე განტოლებებიდან

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n} \quad (2.22)$$

სადაც $\Delta n = (\sum \nu) - (\sum \nu_0)$ გამოსახავს მოლთა რაოდენობის ცვლილებას რეაქციის შედეგად. თუ $\Delta n = 0$, მაშინ $K_p = K_c$. ხსნარში მიმდინარე რეაქციისათვის შესაძლებელია წონასწორობის მუდმივას გამოსახვა მონაწილე ნივთიერებათა მოლური წილის საშუალებით

$$K_N = \frac{N_E^c \cdot N_F^f}{N_M^m \cdot N_N^n} \quad (2.23)$$

მაღალი კონცენტრაციის ხსნარებისათვის კონცენტრაციების ნაცვლად გამოიყენება აქტიურობები. დაწერილებით აქტიურობაზე ქვემოთ.

$$K_{a_i} = \frac{a_E^c \cdot a_F^f}{a_M^m \cdot a_N^n} \quad (2.24)$$

უფრო ხშირად მეტალურგიულ წარმოებაში საქმე გვაქვს რეაქციებთან, რომლებიც პეტეროგენულ სისტემაში მიმდინარეობს. პეტეროგენული ეწოდება სისტემას, რომელიც ორი ან მეტი უახისაგან შედგება. სისტემა შეიძლება შეიცავდეს აირად, თხევად და მყარ (კონდენსირებულ) ფაზებს. მაგალითისათვის შეიძლება მოვიყვანოთ ზემოთ განხილული, ტიტანის დიოქსიდის მყარი ნახშირბადით აღდგენის რეაქცია. რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებებიდან ორი კონდენსირებულია (TiO_2 , C), ორი კი – აირადი (TiC , CO). წონასწორობის მუდმივა ამ რეაქციისათვის (2.19) ფორმულის მიხედვით გამოისახება განტოლებით

$$K_p = \frac{P_{TiC} \cdot P_{CO}^2}{P_C \cdot P_{TiO_2}} \quad (2.25)$$

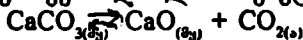
ვინაიდან მოცემული ტემპერატურისათვის P_C და P_{TiO_2} მუდმივი სიდიდეებია (მყარი ნივთიერების ორთქლის ღრეკადობა), ამიტომ შესაძლებელია მათი გადატანა განტოლების მარცხენა მხარეს

$$P_C \cdot P_{TiO_2} \cdot K_p = K_p'$$

საიდანაც

$$K_p' = P_{TiC} \cdot P_{CO}^2 \quad (2.26)$$

ანალოგიურად კირქვის დაშლის რეაქციისათვის



$$K_p = P_{CO_2}$$

P_{CO_2} სიდიდეს (CO_2 -ის წონასწორული პარციალური წნევა) $CaCO_3$ -ის დისოციაციის დრეკადობას უწოდებენ.

2.1.7 ქიმიური რეაქციის იზოთერმისა და იზობარის განტოლებები

თუ კი (2.18) რეაქცია მიმდინარეობს წონასწორული მდგომარეობიდან საკმარის გადახრის პირობებში და მორეაგირე ნივთიერებათა საწყისი პარციალური წნევები $P_M^i, P_N^i, P_E^i, P_F^i$ (ან აქტიურობები $a_M^i, a_N^i, a_E^i, a_F^i$) განსხვავდება სტანდარტულისაგან, მაშინ ფიზიკური ქიმიის კურსიდან ცნობილი განტოლების მიხედვით აღნიშნული რეაქციის გიბსის ენერჯიის ცვლილებასა და წონასწორობის მუდმივას შორის დამოკიდებულება ასე გამოისახება:

$$\Delta G = RT \left(\ln \frac{P_E^i P_F^i}{P_M^i P_N^i} - \ln K_p \right) \quad (2.27)$$

ან

$$\Delta G = RT \left(\ln \frac{a_E^i a_F^i}{a_M^i a_N^i} - \ln K_a \right). \quad (2.27a)$$

თუ (2.18) რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებები სტანდარტულ მდგომარეობაშია, მაშინ (2.17) და (2.17a) გამოსახულებების მარჯვენა მხარეს მოთავსებული პირველი წევრები ნულს უტოლდება და განტოლებები მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_p = -19,15 \text{ Tlg} K_p, \quad (2.28)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_a = -19,15 \text{ Tlg} K_a. \quad (2.28a)$$

ეს განტოლებები ცნობილია ქიმიური რეაქციების იზოთერმების სახელით. ისინი საშუალებას იძლევა გამოვითვალოთ გიბსის ენერჯიის ცვლილების სტანდარტული სიდიდეები, თუკი ცნობილია K -ს მნიშვნელობები და პირიქით.

იზოთერმის განტოლების გარდა ფიზიკურ ქიმიაში დიდი მნიშვნელობა აქვს ქიმიური რეაქციის იზობარის განტოლებას

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}, \quad (2.29)$$

რომელიც რეაქციის წონასწორობის მუდმივასა და ენთალპიის ტემპერატურით გამოწვეულ ცვლილებებს შორის დამოკიდებულებას გამოსახავს. იგი ლე-შატელიეს ცნობილი პრინციპის მათემატიკური გამოსახულებაა. ამ განტოლებიდან ვასკენით, რომ

$\frac{d \ln K_p}{dT}$ წარმოებულის ნიშანი განისაზღვრება რეაქციის ენთალ-

პიის ნიშნით. თუ რეაქცია ენდოთერმულია, მაშინ $\frac{d \ln K_p}{dT} > 0$ ე.ი.

ტემპერატურის მომატებით წონასწორობის მუდმივა იზრდება (რეაქცია მიმდინარეობს მარცხნიდან მარჯვნივ, მიიღება რეაქციის

პროდუქტები). თუ რეაქცია ეგზოთერმულია, მაშინ $\frac{d \ln K_p}{dT} < 0$ ე.ი.

ტემპერატურის ზრდა იწვევს წონასწორობის წანაცვლებას საწყისი ნივთიერებებისაკენ.

2.1.8 ქიმიური სწრაფვა. ქიმიური რეაქციის წონასწორობის გაანგარიშება

ქიმიური სწრაფვა გამოსახავს ნივთიერებათა ქიმიური ურთიერთქმედების უნარს. ადრე ქიმიური სწრაფვის საზომად მიღებული იყო რეაქციის დროს გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა (ბერთლოს პრინციპი). ამ პრინციპის თანახმად, თავისთავად მხოლოდ ეგზოთერმული რეაქციები მიმდინარეობს. ექსპერიმენტული მასალის დაგროვებამ აჩვენა, რომ ბერთლოს პრინციპი ზოგად შემთხვევაში მართებული არ არის. არსებობს უამრავი თავისთავად მიმდინარე ენდოთერმული რეაქცია. გარდა ამისა ქიმიური რეაქცია თუ ერთი მიმართულებით ეგზოთერმულია, შებრუნებული რეაქცია ენდოთერმული იქნება. ამჟამად ქიმიური სწრაფვის საზომად მიღებულია არა სითბური ეფექტი, ე.ი. ენერჯიის არა საერთო კარგვა, არამედ თავისუფალი ენერჯიის (გიბსის ენერჯია) კარგვა. ამრიგად, პროცესებისათვის, რომლებიც მიმდინარეობს ტემპერატურისა და წნევის მუდმივობის პირობებში: ქიმიური სწრაფვის საზომად მიღებულია გიბსის ენერჯიის ცვლილება $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$.

ადრე აღენიშნეთ, რომ თავისთავად მიმდინარე პროცესებისათვის აუცილებელია G-ს კლებადობა ($\Delta G < 0$). განვმარტოთ კონკრეტულ მაგალითზე. განვსაზღვროთ 1000 K-ზე $2Fe + O_2 = 2FeO$ და $2Ni + O_2 = 2NiO$ რეაქციების თავისთავად მიმდინარეობის შესაძლებ-

ლობა. თუ Fe და Ni სტანდარტულ მდგომარეობაშია, მაშინ ორივე რეაქციის ΔG° ადვილად იანგარიშება განტოლებით $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \cdot \Delta S^\circ$. შესაბამისად $\Delta G^\circ_{FeO} = -400000$ ჯ, $\Delta G^\circ_{NiO} = -306000$ ჯ. ამრიგად, მოცემულ პირობებში შესაძლებელია ორივე რეაქციის თავისთავად მიმდინარეობა, მაგრამ უნებადის სწრაფვა რკინისადმი გაცილებით მეტია, ვიდრე ნიკელისადმი.

უნდა აღინიშნოს, რომ ბერთლოს პრინციპი გამართლებულია, როცა $T=0$. ამ პირობებში (2.15) განტოლების მიხედვით $\Delta G = \Delta H$, მაგრამ, ვინაიდან მეტალურგიულ წარმოებაში მიმდინარე რეაქციების პირობები მაღალტემპერატურულია, ამიტომ ნივთიერების ქიმიური სწრაფვის განსასაზღვრავად უსარგებლოთ გიბსის ენერჯის ცვლილებით.

ქიმიური რეაქციების წონასწორობის თერმოდინამიკური ანგარიშებისათვის იყენებენ ენტროპიული ან ნერნსტის განტოლებების მეთოდებს. პრაქტიკული თვალსაზრისით უფრო მოსახერხებელია პირველი. ამიტომ განვიხილათ ამ მეთოდს.

ქიმიური რეაქციების წონასწორობის გაანგარიშება ენტროპიული განტოლებებით. გაანგარიშებას საფუძვლად უდევს $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \cdot \Delta S^\circ$ განტოლება; სტანდარტული პირობებისათვის: $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \cdot \Delta S^\circ$.

აქედან, ქიმიური რეაქციის იზოთერმის განტოლების (2.28) გამოყენებით ვღებულობთ

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_p = -19,15 T \lg K_p; \lg K_p = -\frac{\Delta H^\circ}{19,15 T} + \frac{\Delta S^\circ}{19,15} \quad (2.30)$$

თუ შევცვლით

$$-\Delta H^\circ = Q_p; \lg K = \frac{Q_p}{19,15 T} + \frac{\Delta S^\circ}{19,15} \quad (2.30a)$$

აქ $\Delta H(-Q_p)$ სითბური ეფექტია, რომელიც მოცემულ ტემპერატურაზე სტანდარტულ მდგომარეობაში მყოფი ნივთიერებებისათვის; $\Delta S^\circ = S_2^\circ - S_1^\circ$, სადაც S_2° რეაქციის პროდუქტების ენტროპიების ჯამია მოცემულ ტემპერატურასა და სტანდარტულ პირობებში, ხოლო S_1° საწყის ნივთიერებათა ენტროპიების ჯამი იმავე პირობებში.

ძირითადად, ცნობარებში მოყვანილი მონაცემები, სითბური ეფექტებისა და ენტროპიების შესახებ, შეესაბამება ოლიხის ტემპერატურებს ($25^\circ C = 298 K$) [34]*. ამ მონაცემების უშუალო გამოყენების

* ცნობარში მოყვანილია მთელი რიგი ნაერსებისათვის და ქიმიური რეაქციებისათვის ΔH და ΔS -ის მაღალტემპერატურული მნიშვნელობები.

სათვის აუცილებელია ვისარგებლოთ ცნობილი განტოლებით [3]:

$$\lg K_p = \frac{-\Delta H^\circ}{19,15} + \frac{\Delta S^\circ}{19,15} + \int_{298}^T dT \int_{298}^T \frac{\sum n C_p dT}{T}, \quad (2.31)$$

სადაც ორმაგინტეგრალიანი წევრი ითვალისწინებს ΔH -სა და ΔS -ის ტემპერატურულ ცვლილებებს.

თუკი რეაქციაში მონაწილე ყველა ნივთიერებისათვის ცნობილია სითბოტევადობის ტემპერატურისგან დამოკიდებულება, მაშინ (2.31) განტოლება ექვემდებარება ზუსტ ანგარიშს და საშუალებას იძლევა გამოვიანგარიშოთ წონასწორული პირობები. პრაქტიკულ ანგარიშებში ამ პროცედურას იშვიათად იყენებენ, ვინაიდან იგი შრომატევადია და მოითხოვს დიდ დროს.

უფრო მოსახერხებელია ულიხის ცნობილი მიახლოებული განტოლების გამოყენება [3]. თუ განვსაზღვრავთ რეაქციაში მონაწილე ყველა ნივთიერების საშუალო თბოტევადობებს 298 K...T (ან 273 K...T) ტემპერატურულ შუალედში, მაშინ (2.31) განტოლებაში $\sum n C_p$ ტემპერატურული ფუნქცია შეიძლება შევცვალოთ მუდმივი $\Sigma \bar{C}_p$ (\bar{C}_p - საშუალო თბოტევადობა) სიდიდით და გარკვეული გარდაქმნების ჩატარებით ორმაგინტეგრალიანი წევრის შემცველი განტოლების ნაცვლად მივიღებთ ულიხის ცნობილ განტოლებას

$$\lg K_p = -\frac{\Delta H^\circ}{19,15} + \frac{\Delta S^\circ}{19,15} + \Sigma \bar{C}_p \frac{\left(\ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \right)}{19,15}. \quad (2.32)$$

$\left(\ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \right)$ გამოსახულება აღინიშნება $f\left(\frac{T}{298}\right)$ -ით და განისაზღვრება [3]-ში მოყვანილი 1 ცხრილიდან. ცხრილებიდან ვიღებთ აგრეთვე ΔH° და ΔS° -ს ანუ ΔH_{298} და ΔS_{298} -ის მნიშვნელობებს და შეგვაქვს (2.32) განტოლებაში.

წონასწორობის გაანგარიშების გამარტივებულ ხერხებს გვთავაზობენ აგრეთვე ტიომკინი და შვარცმანი [8], ვლადიმეროვი [9] და სხვები. გაანგარიშების ეს მეთოდები დაწერილებითაა აღწერილი სპეციალურ ლიტერატურაში და ჩვენ მათზე არ შევჩერდებით.

მეტალურგიულ პრაქტიკაში, ამა თუ იმ რეაქციის წონასწორობის გასაანგარიშებლად, იყენებენ ფორმულას

$$\lg K_p = -\frac{\Delta H^\circ}{19,15} + \frac{\Delta S^\circ}{19,15}. \quad (2.33)$$

ამ შემთხვევაში სარგებლობენ ΔH° -ისა და ΔS° -ის მხოლოდ სტანდარტული საცნობარო მონაცემებით და უგულვებელყოფენ ამ სიდიდეების ტემპერატურულ ცვლილებას. როგორც სოგიერთი მკვლევარი მიუთითებს, ტემპერატურის ზრდით მატულობს ΔH -ისა და ΔS -ის მნიშვნელობებიც. მაგრამ ვინაიდან ისინი სხვადასხვა ნიშნითაა მოთავსებული განტოლების ერთ მხარეს (მარჯვნივ), ამიტომ ΔH -ისა და ΔS -ის სიდიდეთა ზრდა ერთმანეთს აკომპენსირებს. ამრიგად, გაანგარიშების შედეგად მიღებული ცდომილება მოსალოდნელზე ნაკლებია, მაგრამ ამ ანგარიშებში გარკვეული სიფრთხილეა საჭირო. თუ რეაქციის მოცემულ ტემპერატურამდე მასში მონაწილე ნივთიერება განიცდის მოდიფიკაციის ან აგრეგატული მდგომარეობის ცვლილებას, მაშინ ზემოთ დასახელებული სიდიდეების გაანგარიშების შედეგი (საბოლოო) უნდა დაზუსტდეს ამ გარდაქმნების დროს გამოყოფილი ან შთანთქმული სითბოს გათვალისწინებით.

მაგალითად, თუ $\Delta H_{\text{წ}}$ ენთალპიით მიმდინარე რეაქციაში მონაწილე მყარი ნივთიერება T_1 -ზე განიცდის პოლიმორფულ გარდაქმნას დადებითი ΔH_1 ეფექტით, ხოლო T_2 ტემპერატურაზე იგი დნება ΔH_2 ენერჯიის შთანთქმით, მაშინ T_2 -ზე წონასწორობის გაანგარიშებისათვის ($T_2 > T_1$), 'ხვეით მოყვანილ (2.33) განტოლებაში უნდა შევიტანოთ $\Delta H_{\text{წ}} + \Delta H_1 + \Delta H_2$ სიდიდეთა ჯამური ენერგეტიკული ეფექტი, ანალოგიურად უნდა გაეთვალიწინოთ ენტროპიის ცვლილებაც.

შედარებით რთულია მდგომარეობა, როცა საქმე გვაქვს არასტანდარტულ პირობებში (მაგალითად, ხსნარში) მიმდინარე რეაქციებთან. ამ შემთხვევებს განვიხილავთ ქვემოთ, ხსნარების თერმოდინამიკურ თვისებათა გაცნობის შემდეგ.

2.1.9 ხსნარები. შედგენილობა. თერმოდინამიკური ფუნქციები

ხსნარი ეწოდება ჰომოგენურ სისტემას, რომელიც შეიცავს ორ ან რამდენიმე კომპონენტს და შეუძლია გარკვეულ ფარგლებში უწყვეტად ცვალოს შედგენილობა. არსებობს მყარი, თხევადი და აირადი ხსნარები. ფოლადი წარმოადგენს სხვადასხვა მინარევების ხსნარს რკინაში. ფოლადის დნობის პროცესში მონაწილეობას იღებს წიდა, რომელიც სხვადასხვა უანგეულების და სულფიდების ხსნარია. ურთიერთშეხებაში მყოფ თხევად ლითონსა და წიდას შორის მიმდინარეობს ბევრი სხვადასხვა რეაქცია. ამრიგად, ფოლა-

დის დნობის პროცესები მიმდინარეობს ხსნარებში, ხსნარების წარმოქმნით და ხსნარებს შორის. აქედან გამომდინარე, დიდი მნიშვნელობა აქვს ხსნარების თერმოდინამიკურ კანონზომიერებათა ცოდნას.

ხსნარის მახასიათებელი მისი შედგენილობაა. ხსნარების შედგენილობას გამოხატავენ მასურ პროცენტებში. ხშირად სარგებლობენ მოლური (ატომური) წილებით და პროცენტებით. დამოკიდებულება სხვადასხვა ერთეულებს შორის გამოისახება ფორმულით

$$X_j = \frac{n_j}{n_i + n_j + n_k} \dots = \frac{\frac{C_j}{M_j}}{\frac{C_i}{M_i} + \frac{C_j}{M_j} + \frac{C_k}{M_k}} = \frac{C_{ატ. j}}{100}, \quad (2.34)$$

სადაც X_j კომპონენტის მოლური წილია; n_i, n_j, n_k - კომპონენტების მოლელების რაოდენობა; C_i, C_j, C_k კომპონენტების მასური წილია გამოსახული %-ში; $C_{ატ. j}$ - j კომპონენტის მოლური (ატომური) წილია გამოსახული %-ში, ატ. %; თუ საქმე გვაქვს განზავებულ ხსნართან, სადაც n_i და n_k მცირე სიდიდეებია გამხსნელის მოლელების რაოდენობასთან შედარებით, მაშინ შესაძლებელია ვისარგებლოთ გამარტივებული ფორმულით

$$X_j = \frac{n_j}{n_i} = \frac{\frac{C_j}{M_j}}{(M_j \cdot 100)} = \frac{C_{ატ. j}}{100}. \quad (2.35)$$

(2.35) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ განზავებულ ხსნარში გახსნილი j ნივთიერების მოლური წილი მასური კონცენტრაციის პროპორციულია.

ხსნარის კომპონენტების თერმოდინამიკური თვისებების დასახასიათებლად სარგებლობენ პარციალური მოლური სიდიდეებით, რომელთა ქვეშ იგულისხმება ხსნარის ექსტენსიური მახასიათებლების (V, H, S, G და სხვა) კერძო წარმოებულები, ხსნარის მოცემული კომპონენტის n_i მოლთა რაოდენობის მიხედვით, წნევის, ტემპერატურისა და დანარჩენ კომპონენტთა მოლელების რიცხვის მუდმივობის პირობებში

$$\bar{g}_i = \left(\frac{\partial g}{\partial n_i} \right)_{p, T, n_j (j \neq i)} \quad (2.36)$$

ამ განსაზღვრის მოთხოვნები დაკმაყოფილდება, თუ მოცემული კონცენტრაციის ხსნარის დიდ რაოდენობას (დიდ მოცულობას) მუდმივი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში დავამატებთ რომელიმე კონპონენტის 1 მოლს. მაშინ ხსნარის კონცენტრაცია პრაქტიკულად არ შეიცვლება, ხსნარის თვისებების ცვლილება განისაზღვრება დამატებული კომპონენტის პარციალური მოლური სიდიდით. როგორც განმარტებიდან ჩანს, ეს სიდიდეები წარმოადგენს ინტენსიურ მახასიათებლებს. ისინი დამოკიდებულია ხსნარის შედგენილობაზე. ხსნარის ექსტენსიური (ინტეგრალური) თვისებების g -ს განსაზღვრისათვის საჭიროა კომპონენტების პარციალური მახასიათებლების \bar{g}_i , შესაბამის მოლელების რიცხვზე (n_i) ნამრავლების შეჯამება. მაგალითად, ხსნარის ენთალპიისთვის გვექნება $H = \sum(\bar{H}_i \cdot n_i)$, ხოლო ერთი მოლი ხსნარის შემთხვევაში - $H_g = \sum(H_i x_i)$.

იდეალური ხსნარის კომპონენტის პარციალური მოლური მახასიათებელი ტოლია სუფთა მდგომარეობაში მისი მოლური მახასიათებლისა; ($\bar{V}_i = V_i^0$, $\bar{H}_i = H_i^0$)*. ეს ის შემთხვევაა, როცა სუფთა კომპონენტებიდან ხსნარის წარმოქმნისას ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ჯამური ენერგია უცვლელია (ასეთ ხსნარებს სრულყოფილი ჰქვია). ამ დროს ხსნარის მოცულობა და ენთალპია განისაზღვრება კომპონენტების შესაბამისი მოლური სიდიდეების ჯამით: $V = \sum(V_i^0 n_i)$, $H = \sum(H_i^0 n_i)$. მაგრამ ასეთი შემთხვევა ძალზე იშვიათია. უფრო ხშირად საკმე გვაქვს რეალურ ხსნარებთან, როცა გახსნილი კომპონენტის პარციალური მოლური თვისებები საგრძნობლად განსხვავდება შესაბამისი მოლური თვისებებიდან.

რიგი თვისებებისა (კერძოდ ენტროპია და გიბსის ენერგია) არაადიტიურია სრულყოფილ ხსნარშიც კი. ზოგჯერ, ხსნარის კომპონენტების ძლიერი ურთიერთქმედების გამო, პარციალური მოლური მახასიათებლები უარყოფით მნიშვნელობას ღებულობს. ეს ნიშნავს, რომ ერთ-ერთი კომპონენტის დამატებით ხსნარის ექსტენსიური თვისება არა თუ მატულობს, არამედ კლებულობს. მაგალითისთვის შესაძლებელია მოვიყვანოთ სილიციუმის განზავებული ხსნარი თხევად რკინაში, რომელშიც სილიციუმის პარციალური მოლური ენთალპიაა -41 კჯ. ეს სიდიდე მიღებულია სილიციუმის მოლური ენთალპიის $H_{1773}^0 - H_{298}^0 = + 91$ კჯ და 1873 K-ზე რკინაში მისი გახსნის ენთალპიის (-132 კჯ) შეჯამების გზით. ამრიგად, სილიციუმისა და რკინის ურთიერთქმედების შედეგად გამოყოფილი

* ინდექსი 0 მიუთითებს, რომ სითხე სუფთა მდგომარეობაშია.

სითბო აჭარბებს ხსნარის ენთალპიის იმ ნაშაგს, რომელიც შუაქვეს 1873 K ტემპერატურამდე გახურებულ ერთ მოლ სილიციუმს. ამის გამო სილიციუმის პარციალური მოლური ენთალპია უარყოფითი სიდიდეა. მოყვანილი მაგალითი იმის მარყენებელია, რომ პარციალური მოლური სიდიდე ახასიათებს არა მარტო გახსნილ ნივთიერებას, არამედ გამხსნელსაც, უფრო ზუსტად, გამხსნელი ნივთიერების მდგომარეობას განსაზღვრულ ხსნარში.

პარციალურ მოლურ სიდიდეთა შორის ყველაზე მნიშვნელოვანია გიბსის პარციალური მოლური ენერგია, რომელსაც კომპონენტის ქიმიურ პოტენციალს უწოდებენ

$$\mu_i = \bar{G}_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p, T, n_j (i \neq j)}. \quad (2.37)$$

ქიმიური პოტენციალი გვინებებს აღებული ფაზიდან მოცემული კომპონენტის გამოყვანის შესაძლებლობას, რაც შეიძლება მოხდეს აორთქლებით, ქიმიური ურთიერთქმედებით და სხვ. თუ კომპონენტის ქიმიური პოტენციალი μ_i ხსნარში მეტია, ვიდრე ორთქლის ფაზაში (მოცემული p , T წვევის პირობებში), მაშინ კომპონენტი გადადის ორთქლში. აირადი ფაზის წვევის გახრდისას კომპონენტის პოტენციალმა ორთქლში შეიძლება გადააჭარბოს მის პოტენციალს ხსნარში.

ხსნარების თეორიაში უფრო ხშირად სარგებლობენ თერმოდინამიკური მახასიათებლების არა აბსოლუტური, არამედ ფარდობითი მნიშვნელობებით, რომლებიც უფრო ზუსტად გამოსახავენ ხსნარების თავისებურებებს, მექანიკურ ნარევებთან შედარებით. ფარდობითი პარციალური სიდიდე $\Delta \bar{g}_i$ მოცემული კომპონენტის პარციალური და შესაბამისი მოლური მახასიათებლის სხვაობის ტოლია:

$$\Delta \bar{g}_i = \bar{g}_i - g_i^0 \quad (2.38)$$

რაც შეეხება ფარდობით ინტეგრალურ სიდიდეს Δg_m -ს (ინტეგრალური სიდიდე პირობითად აღინიშნება ქვედა m სიმბოლოთი), იგი ხსნარის ინტეგრალური მახასიათებლის g_m -ისა და შესაბამისი g_m^0 სიდიდის (მიღებულია ხსნარების სუფთა კომპონენტების g_i^0 ადიტიური შეკრებით) სხვაობის ტოლია:

$$\Delta g_m = g_m - g_m^0 = g_m - \sum g_i^0 \cdot X_i \quad (2.39)$$

ხსნარების ფარდობითი პარციალური თერმოდინამიკური სიდიდეებისათვის გვექნება

$$\Delta \bar{H}_i = \bar{H}_i - \sum H_i^\circ X_i, \quad (2.40)$$

$$\Delta \bar{S}_i = \bar{S}_i - \sum S_i^\circ X_i, \quad (2.41)$$

$$\Delta \bar{G}_i = \bar{G}_i - \sum G_i^\circ X_i. \quad (2.42)$$

ფარდობითი ინტეგრალური სიდიდეებისათვის

$$\Delta H_m = H_m - \sum H_i^\circ X_i, \quad (2.43)$$

$$\Delta S_m = S_m - \sum S_i^\circ X_i, \quad (2.44)$$

$$\Delta G = G_m - \sum G_i^\circ X_i. \quad (2.45)$$

პარციალური თერმოდინამიკური ფუნქციის სიდიდე განისაზღვრება i კომპონენტის გრამ-ატომისათვის, ხოლო ინტეგრალური სიდიდეები - ხსნარის გრამ-ატომების ან მოლისათვის.

რეალური ხსნარის თვისებების ადიტიურობისაგან გადახრა, რომელიც გამოსახულია თერმოდინამიკურ ფუნქციათა ფარდობითი მნიშვნელობებით, ზოგჯერ შესაძლებელია ნაწილობრივ ან მთლიანად აიხსნას იდეალური (მაგალითად, სრულყოფილი) ხსნარების თეორიით. ამ თეორიის მიხედვით ფარდობითი თერმოდინამიკური სიდიდეები წარმოდგენილია ორი მდგენელით - იდეალურითა და ჭარბით:

$$\Delta g_m = \Delta g_m^{\text{ილ}} + \Delta g_m^{\text{ჭარბი}}; \quad \Delta \bar{g}_i = \Delta \bar{g}_i^{\text{ილ}} + \Delta \bar{g}_i^{\text{ჭარბი}} \quad (2.46)$$

ბუნებრივია, იდეალური ხსნარებისათვის ჭარბი ფუნქციები ნულის ტოლია.

კონკრეტულ შემთხვევაში, თერმოდინამიკური ფუნქციებისათვის (2.46) გამოსახულება შემდეგ სახეს იღებს:

$$\Delta \bar{S}_i = \Delta \bar{S}_i^{\text{ილ}} + \Delta \bar{S}_i^{\text{ჭარბი}}, \quad (2.47)$$

$$\Delta \bar{G}_i = \Delta \bar{G}_i^{\text{ილ}} + \Delta \bar{G}_i^{\text{ჭარბი}}, \quad (2.48)$$

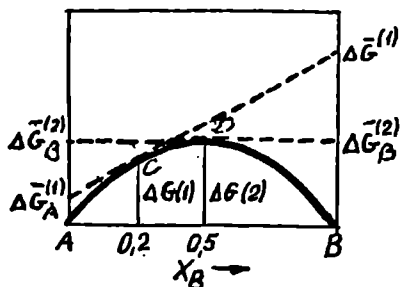
$$\Delta \bar{H}_i = \Delta \bar{H}_i^{\text{ჭარბი}}. \quad (2.49)$$

$$\Delta S_m = \Delta S_m^{\text{ილ}} + \Delta S_m^{\text{ჭარბი}}, \quad (2.50)$$

$$\Delta G_m = \Delta G_m^{\text{ილ}} + \Delta G_m^{\text{ჭარბი}}, \quad (2.51)$$

$$\Delta H_m = \Delta H_m^{\text{ჭარბი}}. \quad (2.52)$$

ენტალპიის ფარდობითი და ჭარბი სიდიდეები ადეკვატურია, ვინაიდან იდეალური ხსნარებისათვის ენთალპიის ფარდობითი სიდიდე ნულის ტოლია.



ქვემოთ მოყვანილია ხსნარების ბინარული სისტემის ინტეგრალურ და პარციალურ თერმოდინამიკურ სიდიდეებს შორის კავშირი, გამოხატული ანალიზური (2.53–2.55 განტოლებები) და გრაფიკული სახით (სურ.2.1)

$$\Delta H_m = X_A \Delta \bar{H}_A + X_B \Delta \bar{H}_B, \quad (2.53)$$

$$\Delta S_m = X_A \Delta \bar{S}_A + X_B \Delta \bar{S}_B, \quad (2.54)$$

$$\Delta G_m = X_A \Delta \bar{G}_A + X_B \Delta \bar{G}_B. \quad (2.55)$$

ბინარულ ხსნარში ორივე კომპონენტის პარციალური მოლური სიდიდეების განსაზღვრა საკმაოდ რთული ამოცანაა.

სურ. 2.1. ორკომპონენტიან ხსნარში დამოკიდებულება ინტეგრალურ და პარციალურ სიდიდეებს შორის $\Delta G_A^{(1)} - \Delta G_B^{(1)}$ და $\Delta G_A^{(2)} - \Delta G_B^{(2)}$ წრფეები შესაბამისად c და d წერტილებში გავლებული მხებებია.

თუკი ცნობილია ერთი კომპონენტის პარციალური ფუნქცია, მაშინ გიბს-დიუჰემის ცნობილი განტოლების მიხედვით $X_1 d\mu_1 + X_2 d\mu_2 = 0$ შეგვიძლია განვსაზღვროთ მეორე კომპონენტის პარციალური სიდიდე. ამ განტოლებიდან გამომდინარე, დამოკიდებულებები თერმოდინამიკური ფუნქციების პარციალურ სიდიდეთა შორის ($\Delta \bar{H}, \Delta \bar{S}, \Delta \bar{G}$) გამოისახება შემდეგი განტოლებებით:

$$X_A d\bar{H}_A + X_B d\bar{H}_B = 0, \quad (2.56)$$

$$X_A d\bar{S}_A + X_B d\bar{S}_B = 0, \quad (2.57)$$

$$X_A d\bar{G}_A + X_B d\bar{G}_B = 0. \quad (2.58)$$

თუ (2.56–2.58) გამოსახულებებს გაეყოფთ dX_A -ზე, მაშინ მუდმივი წნევისა და ტემპერატურისათვის იმის გათვალისწინებით, რომ $X_A + X_B = 1$ (ე.ი. $dX_A = -dX_B$), გექნება:

$$X_A \left(\frac{\partial \bar{H}_A}{\partial X_A} \right)_{p,T} = X_B \left(\frac{\partial \bar{H}_B}{\partial X_B} \right)_{p,T} \quad (2.59)$$

$$X_A \left(\frac{\partial \bar{S}_A}{\partial X_A} \right)_{p,T} = X_B \left(\frac{\partial \bar{S}_B}{\partial X_B} \right)_{p,T} \quad (2.60)$$

$$X_A \left(\frac{\partial \bar{G}_A}{\partial X_A} \right)_{p,T} = X_B \left(\frac{\partial \bar{G}_B}{\partial X_B} \right)_{p,T} \quad (2.61)$$

ეს განტოლებები საშუალებას იძლევა ერთი კომპონენტის პარციალური მოლური სიდიდეები გამოვითვალოთ მეორე კომპონენტის პარციალური მოლური სიდიდეების კონცენტრაციული დამოკიდებულების მიხედვით. გიბს-დიუჰემის განტოლების გარდაქმნის შედეგად ვლუბულობთ ხსნარის ინტეგრალური თერმოდინამიკური ფუნქციებისა და ერთ-ერთი კომპონენტის პარციალურ მოლურ სიდიდეთა შორის დამოკიდებულებების გამოთქახველ განტოლებებს:

$$\Delta H = X_A \cdot \int_0^{X_A} \Delta \bar{H}_A \cdot d \frac{X_A}{X_B} \quad (2.62)$$

$$\Delta S = X_A \cdot \int_0^{X_A} \Delta \bar{S}_A \cdot d \frac{X_A}{X_B} \quad (2.63)$$

$$\Delta G = X_A \cdot \int_0^{X_A} \Delta \bar{G}_A \cdot d \frac{X_A}{X_B} \quad (2.64)$$

გიბს-დიუჰემის განტოლებები ვრცელდება მრავალკომპონენტთან სისტემებზეც.

2.1.10 რაულისა და ჰენრის კანონები

ცნობილია ორი სახის იდეალური ხსნარი: სრულყოფილი და განზავებული. სრულყოფილი ხსნარის თვისებებს აღწერს რაულის კანონი, რომლის მიხედვით ერთ-ერთი კომპონენტის ორთქლის წნევა მისი მოლური წილის პირდაპირპროპორციულია

$$P_i = P_i^\circ X_i \quad (2.65)$$

სადაც P_i° კოეფიციენტი სუფთა კომპონენტის ორთქლის წნევაა ($P_i = P_i^\circ$, როცა $X_i = 1$). ზოგიერთი რეალური ხსნარი ძლიერ ახლოსა სრულყოფილთან. როგორც წესი, ასეთი ხსნარის კომპონენტთა ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები ძალზე მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისაგან. მაგალითისათვის შეიძლება დავასახელოთ Fe-Co, FeO-MnO და სხვა ნაღვლები. ბუნებრივია, რეალური ნაღვლების აღწერა რაულის კანონით დამოკიდებულია დასაშვებ სიზუსტეზე: რაც ნაკლებია სიზუსტე, მით მეტი ხსნარი შეიძლება მივაკუთნოთ სრულყოფილს.

განზავებული ხსნარისათვის სამართლიანია ჰენრის კანონი, რომლის მიხედვითაც გახსნილი ნივთიერების ორთქლის წნევა მისი კონცენტრაციის პირდაპირპროპორციულია:

$$P_i = K_i^\circ C_i (i \neq 1)^* \quad (2.66)$$

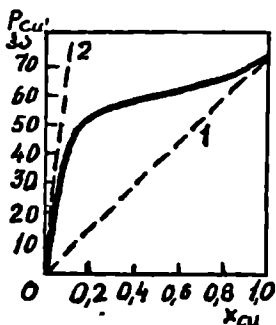
სადაც K_i ჰენრის მუდმივაა.

ვინაიდან განზავებულ ხსნარებში კონცენტრაციებს შორის დამოკიდებულება (მიუხედავად იმისა, რა ერთეულებშია გამოსახული შედგენილობა) დაახლოებით პირდაპირპროპორციულია. ამიტომ (2.66) გამოსახულება პრაქტიკულად სამართლიანია კონცენტრაციის ნებისმიერ ერთეულებში გამოხატვისას. უფრო ხშირად სარგებლობენ მასური პროცენტებით. K_1 კოეფიციენტი დამოკიდებულია ხსნარის კომპონენტების ქიმიურ ბუნებაზე და აგრეთვე იმაზე, თუ რა ერთეულებშია გამოსახული კონცენტრაცია. სოცად

შემთხვევაში $K_1 \neq P_1^0$, გამონაკლისს წარმოადგენს მხოლოდ სრულყოფილი ხსნარები (ისიც იმ შემთხვევაში, თუკი კონცენტრაცია მოლური წილითაა მოცემული). კონცენტრაციული ინტერვალში, რომელშიც რეალური ხსნარები ემორჩილება პენრის კანონს, მერყეობს პროცენტის წილიდან რამდენიმე პროცენტამდე. სურათზე 2.2 მოყვანილია Cu-Fe ნალღობის ზედაპირთან შეხებაში მყოფი სპილენძის ორთქლის წნევის გამომსახველი გრაფიკი. აქვე გამოსახულია ორი წყვეტილი წირი 1 და 2, რომლებიც იდეალური ხსნარების ორ ტიპს შეესაბამება. როგორც სურათიდან ჩანს, სპილენძის ორთქლის წნევა რაულის კანონს ემორჩილება კონცენტრაციის მცირე ინტერვალში – სეფთა სპილენძის სიახლოვეს. კონცენტრაციის სხვა ინტერვალში გამოკვეთილია დადებითი გადახრა რაულის კანონიდან: რეალური წნევა თუარიულზე გაცილებით მეტია. პენრის კანონიდან გადახრა, ჩვეულებრივად, რაულის კანონიდან გადახრის საწინააღმდეგოა. Cu-Fe სისტემისათვის ეს

გადახრა პენრის კანონიდან უარყოფითია.

ხსნარის კომპონენტის იდეალური ქცევიდან გადახრის ხასიათი დამოკიდებულია მის ქიმიურ ბუნებაზე. თუ სხვადასხვა სახის კომპონენტები ამჟღავნებს ქიმიური ურთიერთქმედების ტენდენციას, მაშინ ხსნარი ხასიათდება რაულის კანონიდან უარყოფითი გადახრით*. ხსნარების ასეთ ტიპს მიეკუთვნება რკინის ნალღობები სილიციუმთან, ალუმინთან, ტიტანთან და სხვა ელემენტებთან. თუ ხსნარში გამოკვეთილია მოლეკულებს შორის უკუბიძგების



სურ. 2.2 Fe-Cu ნალღობის ზედაპირის ზემოთ სპილენძის ორთქლის წნევა (1823 K).
1 - რაულის კანონი
2 - პენრის კანონი

* i ინდექსით აღინიშნება გამხსნელი.

ტენდენცია, მაშინ რაულის კანონიდან გადახრა დადებითია (Fe-Cu სისტემა). რაულის კანონიდან ძლიერი დადებითი გადახრის შემთხვევაში ხსნარი განშრევდება ორ შეურეველ სითხედ.

2.1.11 სრულყოფილი ხსნარები

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, იდეალური სრულყოფილი ხსნარი წარმოადგენს ხსნარის ისეთ მოდელს, სადაც რაულის კანონი აბსოლუტური სიზუსტით ხორციელდება ხსნარის შედგენილობების მთელ ინტერვალში. სუფთა კომპონენტებიდან ასეთი ხსნარის წარმოქმნისას ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ჯამური ენერგია უცვლელია. სრულყოფილი ხსნარის წარმოქმნის სითბური ეფექტი (მომავალში ვისარგებლებთ ამ ტერმინით ფარდობითი პარტიკულური მოლური ენთალპიის ნაცვლად) და მოცულობის ცვლილებები ნულის ტოლია: $\Delta H_m = 0$, $\Delta H_i = 0$; $\Delta V_m = 0$; $\Delta V_i = 0$. სრულყოფილი ხსნარის თავისთავად წარმოქმნის ძირითად განმსაზღვრელ ფაქტორს ენტროპიის ცვლილება წარმოადგენს. ეს ცვლილება გამოწვეულია იმით, რომ ხსნარის თერმოდინამიკური ალბათობა (ნებისმიერი მოლეკულა შესაძლებელია განლაგდეს ხსნარის მიერ დაკავებული მოცულობის ნებისმიერ ნაწილში) იმ სისტემის ალბათობასთან შედარებით, რომლის ერთი სახის კომპონენტი იკავებს მხოლოდ თავის კუთვნილ მოცულობას (რომელიც საერთო მოცულობის ნაწილს შეადგენს), უფრო მაღალი მნიშვნელობისაა. სრულყოფილი ხსნარის წარმოქმნისას გამორიცხულია ენტროპიის დამატებითი ცვლილებები, გამოწვეული ქაოსურად განლაგებული მოლეკულების შესაძლებელი მოწესრიგებით. სრულყოფილი ხსნარის წარმოქმნისას პარციალური და ინტეგრალური ენტროპიების ცვლილებები გამოისახება შემდეგი ფორმულებით:

$$\Delta S_m = -R \sum (X_i \ln X_i), \quad (2.67)$$

$$\Delta \bar{S}_i = -R \ln X_i, \quad (2.68)$$

აქედან:

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T \Delta S_m = RT \sum X_i \ln X_i, \quad (2.69)$$

$$\Delta \bar{G}_i = \Delta \bar{H}_i - T \Delta \bar{S}_i = RT \ln X_i, \quad (2.70)$$

$$\Delta \bar{G}_i = \mu_i = \mu_i^0 + RT \ln X_i. \quad (2.71)$$

* ასეთი ხსნარების წარმოქმნა გაადვილებულია.

სადაც μ_0^0 კომპონენტის ქიმიური პოტენციალია სტანდარტულ მდგომარეობაში ($X_i=1$). მოყვანილი გამოსახულებებიდან ($X_i < 1$ პირობის გათვალისწინებით) ნათლად ჩანს, რომ სრულყოფილი ხსნარის წარმოქმნას თან ახლავს ენტროპიის ზრდა. ამივე დროს სისტემის გიბსის ენერჯია ყოველთვის იკლებს, ვინაიდან ეს ცვლილება მხოლოდ ენტროპიული წვევრითაა გამოწვეული. გარდა ამისა, თუკი ცნობილია შედგენილობა და ტემპერატურა, შესაძლებლობა გვაქვს გამოვითვალოდ სრულყოფილი ხსნარის შედარებითი თერმოდინამიკური ფუნქციების მნიშვნელობები, ხოლო ენტროპიის ცვლილების განსაზღვრისათვის შედგენილობის ცოდნაც კი საკმარისია. კერძოდ, (2.67) განტოლებიდან ვღებულობთ, რომ სრულყოფილ ბინარულ ხსნარში ΔS_m -ს გამომსახველი წირი სიმეტრიული ხასიათისაა და $X_1=X_2=0.5$ წერტილში აღწევს მაქსიმუმს (5,77 გ/მ).

2.1.12 იდეალური განზავებული ხსნარები

იდეალური განზავებული ხსნარების მოდელის ექსპერიმენტულ საფუძველს პენრის კანონი წარმოადგენს. სრულყოფილი ხსნარის მოდელისგან განსხვავებით, ეს მოდელი არ განსაზღვრავს გახსნილი ნივთიერების გამხსნელთან ურთიერთქმედების ენერჯიას. სიმარტივისათვის (აუცილებელი პირობა ნებისმიერი მოდელისათვის) უგულებელყოფილია გახსნილ ნივთიერებათა მოლეკულების ერთმანეთთან ურთიერთქმედება მათი მცირე კონცენტრაციის გამო. ამდენად, განზავებულ ხსნარში გასახსნელი ნივთიერების დამატება იწვევს ენთალპიისა და შიგა ენერჯიის სიდიდეთა ისეთივე ცვლილებებს, როგორსაც მისი შეყვანა სუფთა გამხსნელში (აუცილებელი პირობაა, რომ ხსნარი დამატების შემდეგაც ინარჩუნებდეს განზავებულ მდგომარეობას), ე.ი. გახსნილი ნივთიერების პარციალური მოლური ენთალპია \bar{H}_2 , აგრეთვე გახსნის სითბო $\Delta\bar{H}_2$, არაა დამოკიდებული კონცენტრაციის ცვლილებაზე: $\bar{H}_2 = \bar{H}_2^0 = \text{const}$, $\Delta\bar{H}_2 = \Delta\bar{H}_2^0 = \text{const}$. ნიშანი ∞ მიუთითებს, რომ ეს სიდიდე მიეკუთვნება საწყისი კონცენტრაციების არეს და მისი მნიშვნელობა იგივეა, რაც იქნებოდა უსასრულოდ განზავებულ ხსნარში.*

* ლიტერატურაში ხშირად ასეთ სიდიდეებს აღნიშნავენ სტანდარტული სიდიდეების ინდექსით (მაგ., H^0).

განსაყვებელი ხსნარის წარმოქმნისას ენტროპიის ცვლილება ΔS_2 წარმოადგენს ორი სიდიდის ჯამს. პირველი სიდიდე დაკავშირებულია მოლეკულის მდგომარეობის ცვლილებასთან და, ბუნებრივია, ხსნარის განსაყვების არეში იგი არაა დამოკიდებული შედგენილობაზე. მეორე სიდიდე, როგორც ეს სრულყოფილ ხსნარებშია, დაკავშირებულია იმ მოცულობის ზრდასთან, რომელსაც იკავებს გახსნილი ნივთიერების მოლეკულები თავისუფალი მდგომარეობიდან ხსნარში გადასვლისას. ეს სიდიდე მე-2 კომპონენტის მოცულობის რაოდენობრივი ერთეულის ლოგარითმის პროპორციულია ანუ ნებისმიერ ერთეულებში გამოხატული C_2 კონცენტრაციის უკუპროპორციულია. ამრიგად, $\Delta S_2 = A - R \ln C_2$ (A მუდმივი სიდიდეა, რომელიც არაა დამოკიდებული ხსნარის შედგენილობაზე, მაგრამ დამოკიდებულია G_2 -ის განზომილების ერთეულის შერჩევაზე). აქედან

$$\overline{\Delta G_2} = \Delta \overline{H_2} - AT + RT \ln C_2, \quad (2.72)$$

$$\mu_2 = \mu_2^\circ + \Delta \overline{H_2} - AT + RT \ln C_2 = \psi_2^\circ + RT \ln C_2. \quad (2.73)$$

თუ $C_2 = 1$, მაშინ $\mu_2 = \psi_2^\circ$, საიდანაც გამოდის, რომ $\psi_2^\circ = \mu_2^\circ + \Delta \overline{H_2} - AT$. ψ_2° - სიდიდე წარმოადგენს მე-2 კომპონენტის ქიმიურ პოტენციალს მეორე ტიპის სტანდარტულ მდგომარეობაში, ე.ი. როცა იდეალურ ხსნარში კონცენტრაცია ერთის ტოლია (მაგ., $C_2 = 1$ %). აქ მოყვანილი ფორმულიდან ჩანს, რომ იდეალური განსაყვებელი ხსნარის მოდელის საფუძველზე, გახსნილი ნივთიერების ფარდობითი პარციალური სიდიდეების გამოსათვლელად საჭიროა ურთიერთქმედებისათვის დამახასიათებელი პარამეტრების ცოდნა. (2.73) განტოლებიდან ჩანს, რომ ნებისმიერი ტემპერატურისა და შედგენილობისათვის ΔG_2 -ის გამოსათვლელად აუცილებელია გვექონდეს სხვადასხვა ტემპერატურაზე განსაზღვრული ΔG_2 სიდიდის ორი ექსპერიმენტული მნიშვნელობა მაინც. ამ მონაცემების საფუძველზე გამოვიანგარიშებთ $\Delta \overline{H_2}$ და A მუდმივ სიდიდეებს (უშვებთ, რომ მათი ცვლილებები არაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე). იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა განვსაზღვროთ გიბსის ენერჯიის კონცენტრაციული დამოკიდებულება მოცემული ტემპერატურისათვის, მაშინ ΔG_2 -ის მხოლოდ ერთი ექსპერიმენტული მნიშვნელობაც კი საკმარისია, რომლის საშუალებითაც ($T = \text{const}$) გამოითვლება მუდმივი სიდიდე ($\Delta \overline{H_2} - AT$).

გახსნილი ნივთიერებისგან განსხვავებით, იდეალურ განსაყვებელ ხსნარში გამხსნელის თერმოდინამიკური ფუნქციები შეიძლება გამოვთვალოთ სრულყოფილი ხსნარების ფორმულებით. ამის დასამტკიცებლად ვიყენებთ გიბს-დიჰემის განტოლებას.

ეუშვებთ, რომ გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაცია გამოსახულია მოლურ წილებში ($C_2 = X_2$). (2.73) განტოლების დიფერენცირებით ვღებულობთ: $(\partial \mu_1 / \partial X_2)_{p,T} = RT / X_2$ თუ ამ გამოსახულებას შევიტანთ (2.61) განტოლებაში და გავითვალისწინებთ (2.37) ფორმულას, ვიპოვიით

$$X_1 \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial X_1} \right)_{p,T} = X_2 \left(\frac{\partial \mu_2}{\partial X_2} \right)_{p,T} = \frac{X_2 RT}{X_2} = RT \quad (2.74)$$

განტოლების ორივე მხარის $X_1 / \partial X_1$ ფარდობაზე გაყოფით მივიღებთ

$$d\mu_1 = RT \left(\frac{dX_1}{X_1} \right). \quad (2.75)$$

ხოლო ამ განტოლების ინტეგრირებით გვექნება

$$\mu_1 = RT \ln X_1 + \text{const}. \quad (2.76)$$

განტოლების მუდმივა შეიძლება განესაზღვროთ პირობიდან $\mu_1 = \mu_1^\circ$, როცა $X_1 = 1$. ამ გარდაქმნის შედეგად მიღებული ფორმულა $\mu_1 = \mu_1^\circ + RT \ln X_1$ ემორჩილება სრულყოფილი ხსნარების თეორიას. ზემოთქმულის საილუსტრაციოდ შეგვიძლია გამოვიყენოთ სურათი 2.2, საიდანაც ჩანს, რომ სპილენძის მცირე კონცენტრაციებისას მისი ქცევა შეესაბამება იდეალური განზავებული ხსნარის მოდელს (ჰენრის კანონი); მაღალი კონცენტრაციების არეში, როცა სპილენძი გამხსნელის როლშია, მისი ქცევა განისაზღვრება სრულყოფილი ხსნარის მოდელით (რაულის კანონი), რკინის მოქმედება პირველ შემთხვევაში აღიწერება რაულის კანონით, ხოლო მეორე შემთხვევაში - ჰენრის კანონით. განზავებული ხსნარებისათვის ინტეგრალურ მახასიათებლებს ეპოყლობთ პარციალური სიდიდეების მიხედვით ან (2.53–2.55) განტოლებების გამოყენებით, ან გრაფიკულად.

2.1.13 აქტიურობა

რეალურ ხსნარებში კომპონენტის აორთქლების ან რეაქციაში მონაწილეობის მიღების შესაძლებლობა არ განისაზღვრება მხოლოდ კონცენტრაციით. ეს მუდმივდება გადახრებით რაულის და ჰენრის კანონებიდან, აგრეთვე იმით, რომ ხსნარების მონაწილეობით მიმდინარე რეაქციის კონცენტრაციების ფარდობით გამოსახული კონსტანტები ვერ ინარჩუნებს თავიანთ მუდმივობას

ერთი კონცენტრაციიდან სხვა კონცენტრაციაზე გადასვლისას. ამ გადახრების მთავარი მიზეზი გახლავთ კომპონენტის ურთიერთქმედება ხსნარის სხვა ნივთიერებებთან. აქტიურობა არის ის რაოდენობრივი მახასიათებელი, რომელიც ითვალისწინებს კონცენტრაციას და ამავე დროს, ხსნარში კომპონენტების ურთიერთქმედებას.

$$a_i = \frac{p_i}{p_i^0}, \quad (2.77)$$

სადაც p_i კომპონენტის პარციალური წნევაა ხსნარის ზედაპირის ზემოთ; p_i^0 იგივე სიდიდეა i კომპონენტის სტანდარტულ მდგომარეობაში.

სტანდარტულ მდგომარეობაში აქტიურობა ერთის ტოლია. თუ ვიხილავთ რაულის კანონიდან გადახრას, მაშინ სტანდარტულ მდგომარეობად ავირჩევთ სუფთა კომპონენტს. ასეთი გზით განსაზღვრული აქტიურობას (a_i^R) და, მოლურ წილს შორის დამოკიდებულება გამოსახება განტოლებით

$$z_i^R = \gamma_i x_i \quad (2.78)$$

სადაც γ_i აქტიურობის კოეფიციენტი. თუკი დაცულია რაულის კანონი, მაშინ (2.65) და (2.77) განტოლებების მიხედვით, $z_i^R = x_i$ და $\gamma_i = 1$. იდეალურობიდან უარყოფითი გადახრისას $\gamma_i < 1$, ხოლო დადებითი გადახრისას $\gamma_i > 1$. ამრიგად, აქტიურობის კოეფიციენტი, ერთი და იგივე კონცენტრაციის პირობებში, აჩვენებს რეალურ და სრულყოფილ ხსნარებს შორის არსებულ რაოდენობრივ სხვაობას. სურათიდან 2.2 ჩანს, რომ ეს განსხვავება განსაკუთრებით საგრძნობია განზაფხბული ხსნარისათვის და კლებულობს კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად. ანალოგიური სურათი შეიმჩნევა სხვა ხსნარებშიც. ამიტომ, აქტიურობის კოეფიციენტი (γ) უსასრულოდ განსავებულ ხსნარში სუფთა კომპონენტის მიმართ დებულობს მაქსიმალურ ან მინიმალურ მნიშვნელობებს იმისდა მიხედვით, გადახრა იდეალურობიდან დადებითია თუ უარყოფითი. i კომპონენტის კონცენტრაციის ზრდით γ_i -ს მნიშვნელობა ერთს უახლოვდება. γ_i სიდიდეს, რომელიც მიუთითებს ჰენრის კანონის რაულის კანონიდან გადახრაზე, დიდი მნიშვნელობა აქვს პრაქტიკულ ანგარიშებში და მას იყენებენ a_i^R აქტიურობის განსასაზღვრავად კონცენტრაციის იმ შუალედისათვის, სადაც დაცულია ჰენრის კანონი. ამ სიდიდის საფუძველზე გამოთვლიან აგრეთვე კომპონენტის აქტიურობას კონცენტრირებულ და მრავალკომპონენტიან ხსნარებში.

განხილული მეთოდის გარდა არსებობს აქტიურობის განსაზღვრის სხვა მეთოდიც, რომელიც ეყრდნობა არა რაულის კანონიდან გადახრას, არამედ გადახრას პენრის კანონიდან. ამ შემთხვევაში კომპონენტის სტანდარტულ მდგომარეობად თელიან ერთეული კონცენტრაციის მქონე იდეალურ განზავებულ ხსნარს (ამ დროს სტანდარტულ მდგომარეობაში აქტიურობა ერთის ტოლია).

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, პენრის კანონში კონცენტრაცია შესაძლებელია გამოვსახოთ ნებისმიერ ერთეულებში. მილური წილებით სარგებლობის შემთხვევაში სტანდარტულ მდგომარეობად მიიღებენ ჰიპოთეზურ განზავებულ ხსნარს, როცა i კომპონენტის კონცენტრაცია $x_i = 1$ (სეფთა მდგომარეობაში i კომპონენტი იმავე თვისების მატარებელია, რაც განზავებულ ხსნარში). სტანდარტული მდგომარეობის ამგვარი შერჩევას აქტიურობა აღინიშნება γ_i^j -ით, ხოლო აქტიურობის კოეფიციენტი – ϕ_i -თ. განზავებულ ხსნარებში, რომლებიც პენრის კანონს ემორჩილება, $\gamma_i^j = x_i$ და $\phi_i = 1$. სხვა ხსნარებში $\gamma_i^j = \phi_i \cdot x_i$. პენრის კანონიდან უარყოფითი გადახრებისას $\phi_i < 1$, ხოლო დადებითი გადახრებისას – $\phi_i > 1$. უნდა აღინიშნოს, რომ უკანასკნელ შემთხვევაში შეიძლება α_i^j ერთზე მეტი იყოს (განსხვავებით γ_i^j -გან), ვიპოვიოთ ხსნარის კონცენტრაციისაგან დამოუკიდებელი γ_i^k / γ_i^j სიდიდის მნიშვნელობა:

$$\frac{\alpha_i^k}{\alpha_i^j} = \frac{\gamma_i^k x_i}{\phi_i x_i} = \frac{\gamma_i^k}{\phi_i} = \left(\frac{\gamma_i^k}{\phi_i} \right)_{x_i \rightarrow 1} = (\gamma_i^k)_{x_i \rightarrow 1} = \gamma_i^k \quad (2.79)$$

ამ გამოსახულებით მაშინ სარგებლობენ, როცა ერთი სახის აქტიურობის ან აქტიურობის კოეფიციენტების მნიშვნელობები სურთ გამოსახონ სხვა სახის შესაბამისი სიდიდეებით.

შეტ წილ ანგარიშებში მოსახერხებელია კონცენტრაციის გამოსახვა მასურ პროცენტში. კონცენტრაციის ასეთი აღნიშვნისას სტანდარტულ მდგომარეობად შეიძლება ჩაითვალოს i კომპონენტის 1%-იანი ხსნარი, რომელსაც იგივე თვისებები გააჩნია, რაც უსასრულოდ განზავებულ ხსნარს. იმ შემთხვევაში, როცა პენრის კანონიდან გადახრა მხოლოდ 1%-ზე მეტი კონცენტრაციისას შეიმჩნევა, მაშინ სტანდარტული ხსნარი 1%-იან რეალურ ხსნარს შეესაბამება, სხვა შემთხვევაში სტანდარტული მდგომარეობა ჰიპოთეზურია. სტანდარტული მდგომარეობის ამგვარი შერჩევას აქტიურობა აღინიშნოთ γ_i^k -ით, ხოლო აქტიურობის კოეფიციენტი

- როგორც წინა ვარიანტში. იდეალური განზავებული ხსნარისათვის სამართლიანია ტოლობა $a_i^H = c_i (f_i^o = 1)$. ქერის კანონიდან დადებითი გადახრისას $f_i > 1$, ხოლო უარყოფითისას - $f_i < 1$. a_i^H სიდიდე (მსგავსად a_i^L -სა) შეიძლება იყოს ერთზე ნაკლებიც და მეტიც.

განვსაზღვროთ დამოკიდებულება a_i^H და a_i^L -ს და აგრეთვე f_i და γ_i შორის. თუ გამოვიყენებთ (2.35) განტოლებას შემდეგი სახით $C_i/X_i = 100M_i/M_m$, სადაც M_m - ძირითადი შენადნობების მასაა i კომპონენტის გამოკლებით, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{a_i^H}{a_i^L} = \frac{f_i c_i}{\gamma_i x_i} = \left(\frac{f_i c_i}{\gamma_i x_i} \right)_{x_i \rightarrow 0} = \frac{1}{\gamma_i^o} \left(\frac{c_i}{x_i} \right)_{x_i \rightarrow 0} = \frac{100M_i}{\gamma_i^o M_m} \quad (2.80)$$

აქედან

$$f_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_i^o} \cdot M_i \cdot \frac{100}{M_m} \cdot \frac{X_i}{c_i} \quad (2.81)$$

თუ X_i/c_i ნაცელად შევიტანთ მის მნიშვნელობას, განსაზღვრულს (2.34) განტოლების საშუალებით, მაშინ

$$f_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_i^o} \cdot \frac{100M_i}{M_m} \cdot \frac{1}{\frac{c_i}{M_i} + (100 - c_i)M_i} = \frac{\gamma_i}{\gamma_i^o} \cdot \frac{100M_i}{c_i M_m + (100 - c_i)M_i} \quad (2.81a)$$

ანალოგიური განტოლება (ორმაგი ბინარული ხსნარისთვის) მიიღო ლუპისმა [13]:

$$f_2 = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_2^o} \right) \left[x_1 + x_2 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \right] \quad (2.82)$$

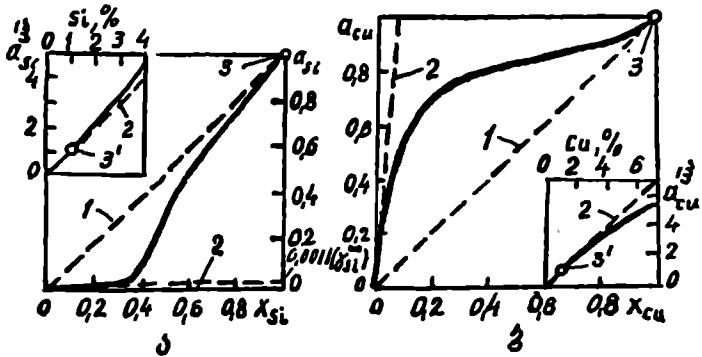
ორივე ეს განტოლება საგრძნობლად განსხვავდება $f_i = \gamma_i/\gamma_i^o$ ფორმულისაგან, რომელსაც ზოგიერთი მკვლევარი იყენებს ანგარიშებში. მაგრამ, მთელ რიგ შემთხვევაში, ამ ფორმულისა და (2.81-2.82) განტოლებების მიხედვით გამოთვლილ სიდიდეთა შორის სხვაობა იმდენად მცირეა, რომ იგი აქტიურობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცდომილებათა: ზღვრებშია მოთავსებული.

საინტერესოა განვიხილოთ 2.3 სურათზე მოყვანილი გრაფიკები. Fe-Si ნალღობში შეიმჩნევა მნიშვნელოვანი უარყოფითი გადახრები რაულის კანონიდან (1 წრფიდან) $\gamma_{Si}^o = 0.0011$. Fe-Cu ნალღობში კი - დადებითი გადახრები. ამ სისტემაში ხსნარის

ყველა შედგენილობისათვის $\gamma_{Cu} > 1$ ($\gamma_{Cu}^0 = 10.1$). სურათზე ხტანდარ-

ტულ მდგომარეობას შეესაბამება წერტილი 3. ხოლო α' აქტიურობის გრაფიკები არაა ნაჩვენები.

აქტიურობის განსაზღვრის ამ ვარიანტისათვის, სტანდარტულ მდგომარეობას შეესაბამება ჰენრის კანონის გამოშვებული 2 წირისა და ორდინატის გადაკეთის წერტილი. 2.3 სურათის დანართებზე, გადიდებულ მასშტაბში, მოყვანილია წირების ის მონაკვეთები, რომლებიც შეესაბამება სილიციუმისა და სპილენძის მკირე კონცენტრაციებს. ამ ჩანართებზე კოორდინატებითაა აღნიშნული კომპონენტის მასური წილი (მას. % - აბსცისა) და აქტიურობა (a_i^H - ორდინატა). ერთი და იგივე სისტემისათვის ჰენრის კანონიდან გადახვევა ყოველთვის რაჟლის კანონიდან გადახრის საწინააღმდეგოა. Fe-Si სისტემაში სილიციუმის 4 % შემცველობისას $a_{Si}^H = 4.6$ და შესაბამისად, $f_1 = 1.15 > 1$; Fe-Cu ნალლობაში სპილენძის 4 % შემცველობისას $a_{Cu}^H = 3.6$ და $f_{Cu} = 0.9 < 1$.



სურ. 2.3. Fe-Si და Fe-Cu ნალლობებში სილიციუმის (1873 K) და სპილენძის (1823 K) აქტიურობების გამოსახულება ორი ხერხით: სუფთა კომპონენტის მიმართ (ძირითადი გრაფიკები) და 1 %-იანი განსაკუთრებული ხსნარების მიმართ (ჩანართები)

მრავალი სისტემის ხსნარებისათვის. მსგავსად Fe-Si სისტემისა. 1 %-ზე ნაკლები კონცენტრაციებისას შეიძინევა ჰენრის კანონიდან გადახრა. მიუხედავად ამისა, სტანდარტულ მდგომარეობად მაინც 1 %-იან ჰიპოთეზურ ხსნარს მიიჩნევენ. რომელიც იდეალური განზავებული ხსნარის თვისებისაა. 2.3 სურათზე ამ მდგომარეობას შეესაბამება 1 %-იანი ორდინატებისა და ჰენრის კანონის გამო-

მსახველი წირების გადაკვეთის 3' წერტილები. რასაკვირველია, ასეთ ხსნარებში კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტის f მნიშვნელობა, ისევე როგორც ამ კომპონენტის 1%-იანი შემცველობის რეალურ ხსნარში, ერთისგან განსხვავებული სიდიდეა.

ლიტერატურაში a_i^r , a_i^l და a_i^s აქტიურობებს ხშირად აღნიშნავენ ერთი და იგივე a_i სიმბოლოთი, მაგრამ ამ შემთხვევაში ტექსტში ან წონასწორობის მუდმივების გამოსახულებებში (შეჰყავთ γ_i , φ_i ან f_i) მიუთითებენ მოცემულ სტანდარტულ მდგომარეობაზე. რეაქციის განტოლებაში სხვადასხვა სიმბოლოებით აღინიშნება რეაგენტების სტანდარტული მდგომარეობებიც. მაგალითად, სილიციუმისათვის, სუფთა კომპონენტს შეესაბამება - $Si_{(cs)}$ ან $Si_{(sp)}$, 1%-იან ხსნარს - $[Si]$ ან $[Si]_{1\%}$ *. სტანდარტულ მდგომარეობას ირჩევენ ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში, იმისდა მიხედვით, თუ რომელი მდგომარეობაა უფრო მოსახერხებელი. ლითონის და წილის ძირითადი კომპონენტებისათვის მეტწილად გამოიყენება სტანდარტული მდგომარეობა - „სუფთა კომპონენტი“, ხოლო შეუსაბამო ხსნადობის სისტემებისათვის (მაგალითად, აირების ხსნარები რკინაში) სტანდარტულ მდგომარეობად ირჩევენ 1%-იან იდეალურ განზავებულ ხსნარს. მსგავსი არჩევანი მოსახერხებელია ლითონებისათვის, როცა ვიხილავთ ნაღვლებს გახსნილი კომპონენტების მცირე შემცველობით.

2.1.14 რეალური ხსნარები

განტოლება, რომელიც აღწერს კომპონენტის ქცევას რეალურ ხსნარში, შესაძლებელია მივიღოთ იდეალური ხსნარების განტოლებიდან, თუ მასში კონცენტრაციებს აქტიურობებით შევცვლით. სრულყოფილი ხსნარებისათვის გამოყვანილი განტოლებების შემთხვევაში სარგებლობენ აქტიურობით, რომელიც ნაპარაუდევი სუფთა კომპონენტის მიმართ. ამ შემთხვევაში ქიმიური პოტენციალის გამოსახულება იღებს შემდეგ სახეს:

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i = \mu_i^\circ + RT \ln \gamma_i + RT \ln X_i \quad (2.83)$$

იზოთერმულ პირობებში 1 მოლი კომპონენტის სტანდარტული მდგომარეობიდან ხსნარში გადასვლისას, შესაბამისი $i_{(cs)} = [i]_{(cs)}$

* ლითონში გახსნილ ნივთიერებებს აღნიშნავენ კვადრატულ ფრჩხილებში ჩასმით, ხოლო წიდაში გახსნილ ნივთიერებებს - მრგვალ ფრჩხილებში.

რეაქციის გიბსის ენერჯის ცვლილება შემდეგი განტოლებით გამოისახება:

$$\Delta \bar{G}_i = RT \ln a_i = RT \ln \gamma_i + RT \ln X_i \quad (2.84)$$

მარჯვენა მხარის პირველი შესაკრები წარმოადგენს გახსნის გიბსის ენერჯის ჭარბ სიდიდეს

$$\Delta \bar{G}_i^{\text{ჭარბი}} = RT \ln \gamma_i \quad (2.85)$$

რომელიც განისაზღვრება ან გახსნის სითბოთი ($\Delta H_i \neq 0$), ან ენტროპიული წვერის გადახრით ($T \cdot \Delta \bar{S}_i^{\text{ჭარბი}} \neq 0$), ან სულაც — ორივეს გავლენით. გიბსის ენერჯის ინტეგრალური მნიშვნელობის განსაზღვრა იოლია (2.84) განტოლებიდან (2.55) ფორმულის გამოყენებით

$$\Delta G_m = x_1 \Delta \bar{G}_1 + x_2 \Delta \bar{G}_2 = RT(x_1 \ln a_1 + x_2 \ln a_2) \quad (2.86)$$

ასევე იოლად შეიძლება დაჭადგინოთ სრულყოფილი ხსნარების განტოლებაში ფორმალურად შეტანილი აქტიურობის თანხმხვევა იმ აქტიურობასთან, რომელიც ადრე იყო განსაზღვრული, როგორც კომპონენტის ორთქლის წნევათა ფარდობა ხსნარის ზედაპირის ზემოთ და სუფთა მდგომარეობაში P_i/P_i° .

განვიხილოთ ხსნარი, რომელიც წონასწორობაშია ორთქლთან. წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე, კომპონენტის ქიმიური პოტენციალი ხსნარში და აირად ფაზაში ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს

$$\mu_{i(\text{გ})} = \mu_{i(\text{ა})} = \mu_{i(\text{ა})}^\circ + RT \ln p_i$$

ანალოგიური განტოლება შეიძლება დაიწეროს სტანდარტული მდგომარეობისათვისაც

$$\mu_{i(\text{გ})}^\circ = \mu_{i(\text{ა})}^\circ + RT \ln p_i^\circ$$

თუ პირველ განტოლებას გამოვაკლებთ მეორეს, მაშინ მივიღებთ: $\mu_{i(\text{გ})} - \mu_{i(\text{გ})}^\circ = RT \ln(P_i/P_i^\circ) = RT \ln a_i$, რომელიც (2.84) განტოლების ეკვივალენტურია.

თუ რეალური ხსნარების ალწერისათვის ავირჩევთ უსასრულოდ განზავებული ხსნარებისათვის გამოყვანილ განტოლებას, მაშინ უნდა ვისარგებლოდ აქტიურობით, რომელიც განსაზღვრულია 1 %-იანი განზავებული ხსნარისათვის. ამ შემთხვევაში ქიმიური პოტენციალის განტოლება შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\mu_i = \psi_i^\circ + RT \ln z_i^\circ = \psi_i^\circ + RT \ln f_i + RT \ln C_i \quad (2.87)$$

იზოთერმულ პირობებში 1 მოლი კომპონენტის 1 %-იანი სტანდარტული ხსნარიდან მოცემული კონცენტრაციის ხსნარში გადასვლისას შესაბამისი $[i]_1 = [i]_2$ რეაქციის გიბსის ენერჯის ცვლილება გამოისახება განტოლებით

$$\Delta G_i = RT \ln a_i^j = RT \ln f_i + RT \ln C_i \quad (2.88)$$

აქტიურობის შეყვანა ზემოთ ჩამოთვლილ განტოლებებში საგრძნობლად აიოლებს რეალური ხსნარების თერმოდინამიკურ თვისებათა შესწავლას, მაგრამ ეს კიდევ არაა ამოცანის ბოლომდე გადაწყვეტა. აქტიურობას ან აქტიურობის კოეფიციენტებს, როგორც წესი, პოულობენ ექსპერიმენტის საშუალებით. მაგრამ აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ თუკი ცნობილია ხსნარის რომელიმე თვისება, ზემოთ მოყვანილი თერმოდინამიკური განტოლებების საშუალებით შეგვიძლია განვსაზღვროთ სხვა თვისებებიც. მაგალითად, განვსაზღვროთ რომელიმე კომპონენტის აქტიურობის კონცენტრაციული დამოკიდებულება. მაშინ გიბს-დოუჰემის განტოლების მიხედვით შეგვიძლია ვიანგარიშოთ იგივე დამოკიდებულება სხვა კომპონენტებისათვისაც. ვთქვათ, სხვადასხვა ტემპერატურებისათვის ცნობილია აქტიურობის ორი მნიშვნელობა. ამ მონაცემების საფუძველზე შესაძლებელია გამოვთვალოთ ნივთიერების გახსნის სითბო. დავეშვათ გავსომეთ ნივთიერების გახსნის სითბო (კალორიმეტრის გამოყენებით). მაშინ, აქტიურობის ერთი მონაცემის მიხედვით შეგვიძლია გამოვთვალოთ გახსნის სითბოს მნიშვნელობა სხვა ტემპერატურისათვის. ყოველივე ეს საგრძნობლად ამცირებს იმ ცდების რაოდენობას, რომლებიც აუცილებელია საკვლევი სისტემის შესახებ სრული ინფორმაციის მისაღებად. მკითხველი სპეციალურ ლიტერატურაში [7,10,14,15] ნახავს მაგალითებს, რომლებშიც ხსნარის რომელიმე ცნობილი თერმოდინამიკური თვისების საფუძველზე გამოანგარიშებულია სხვა თერმოდინამიკური თვისებები.

2.1.15 ერთი სახის სტანდარტული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა

ხშირად, თერმოდინამიკური ანგარიშების აუცილებლობა მოითხოვს ერთი სტანდარტული მდგომარეობის შეცვლას მეორით. მაგალითად, რკინაში გახსნილი სილიციუმის დაჟანგვის რეაქციისათვის ($[\text{Si}]_{(1\%)} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$) გიბსის ენერჯის გამოსათვლელად $\text{Si}_{(1\%)} + \text{O}_{2(g)} = \text{SiO}_2$ რეაქციის გიბსის ენერჯის სტანდარტულ მნიშვნელობას (მოყვანილია თერმოდინამიკურ ცხრილებში) უნდა გამოვაკლოთ $\text{Si}_{(1\%)} = [\text{Si}]_{(1\%)}$ გადასვლის გიბსის ენერჯის მნიშვნელობა.

გაანგარიშებისათვის საჭირო ფორმულის გამოსაყვანად განვიხილოთ A კომპონენტის იდეალური განზავებული ხსნარი B გამსხ-

ნელში. ხსნარში A კომპონენტის ქიმიური პოტენციალი შეიძლება განისაზღვროს ორი გზით. თუ სტანდარტულ მდგომარეობად მიჩნეულია სუფთა A კომპონენტი, მაშინ (2.83) განტოლების მიხედვით და $\gamma_A = \gamma_A^\circ$ ტოლობის გათვალისწინებით მივიღებთ $\mu_A = \mu_A^\circ +$

$+RT \ln(\gamma_A^\circ \cdot X_A)$. ხოლო, თუ სტანდარტულ მდგომარეობად 1 %-იანი ხსნარია მიჩნეული, მაშინ (2.87) განტოლების მიხედვით და იმის გათვალისწინებით, რომ მოცემულ ხსნარში $f_A = 1$, შეგვიძლია ჩავეწეროთ: $\mu_A = \psi_A^\circ + RT \ln C_A$. თუ ორივე შემთხვევაში არჩეულია ენერჯიის ათვლის ერთი და იგივე საწყისი მანქენებელი, მაშინ არა აქვს მნიშვნელობა რომელ სტანდარტულ მდგომარეობაშია გამოსახული μ_A . ამიტომ, ამ განტოლებების მარჯვენა მხარეების გატოლებით და (2.35) ფორმულის გათვალისწინებით, რომლის მიხედვით $X_A = (C_A \cdot M_B) / (M_A \cdot 100)$ ეპოულობთ A კომპონენტის ერთი სტანდარტული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის $A_{(მ_1)} = [A]_{(1)}$ გიბსის ენერჯიის ცვლილებას:

$$\Delta G = \Psi_A^\circ - \mu_A^\circ = RT \ln \frac{(\gamma_A^\circ \cdot X_A)}{C_A} = RT \ln \left(\frac{\gamma_A^\circ \cdot M_B}{M_A - 100} \right). \quad (2.89)$$

ერთი სახის სტანდარტული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის სხვა შემთხვევები განხილულია 2.1.18 ქვეთავში.

2.1.16 რეგულარული ხსნარები

რეგულარული ხსნარების ცნება პირველად გილდებრანტმა შემოიღო. მის მიერ შემოთავაზებულ მოდელში ხსნარის გადახრა სრულყოფილი მდგომარეობიდან, ე.ი. ჭარბი გიბსის ენერჯიის გაჩენა, განპირობებულია მხოლოდ ენთალპიური წევრით

$$\Delta \bar{G}_m^{\text{ჭარბი}} = \Delta \bar{H}_m; \quad \Delta \bar{G}_i^{\text{ჭარბი}} = \Delta \bar{H}_i. \quad (2.90)$$

(2.85) და (2.90) განტოლებების გამოყენებით მიიღება პრაქტიკული ანგარიშებისათვის მეტად საჭირო გამოსახულება

$$\Delta \bar{H}_i = RT \ln \gamma_i. \quad (2.91)$$

ამ განტოლების მიხედვით შესაძლებელია შეფასდეს γ_i -ს ტემპერატურისაგან დამოკიდებულება, თუკი აქტიურობის კოეფიციენტის ერთი მნიშვნელობა მაინც არის ცნობილი. თუ დავუშვებთ, რომ $\Delta \bar{H}_i$ არაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე, მაშინ (2.91)-დან ვღებულობთ

$$\ln \gamma_{i(T)} = \left(\frac{1873}{T} \right) \ln \gamma_{i(1000)} \quad (2.92)$$

იგულისხმება, რომ რეგულარულ ხსნარში გიბსის ენერჯიის ენტროპიული წევრი იგივე სიდიდეა, რაც სრულყოფილ ხსნარში და მას ადვილად გამოვითვლით, თუ დაგუშევთ, რომ ატომების განლაგება ქაოსურია. გამოთვლის შედეგები გამოისახება (2.67) და (2.68) განტოლებებით. ამრიგად, რეგულარული ხსნარის ენერჯიის ინტეგრალური და პარციალური მნიშვნელობები ასე განისაზღვრება:

$$\Delta G_m = \Delta H_m + RT \sum X_i \ln X_i \quad (2.93)$$

$$\Delta \bar{G}_i = \Delta \bar{H}_i + RT \ln X_i \quad (2.94)$$

კარგ შედეგებს იძლევა რეგულარული ხსნარის მოდელის გამოყენება სუსტი ურთიერთქმედების სისტემაში. ასეთ სისტემაში ΔH -ის მნიშვნელობა, რომელიც ატომების გარკვეული ჯგუფის მოწესრიგების ტენდენციის მაჩვენებელია, არ უნდა აღემატებოდეს (ან უმნიშვნელოდ აღემატებოდეს) ატომების სითბური მოძრაობის ენერჯიის RT სიდიდეს. ეს უკანასკნელი მოწესრიგებლობის ტენდენციის განმსაზღვრელია. ამრიგად, ტემპერატურის გაზრდით რეგულარული ხსნარების შესაძლებელი გამოყენების არე საკმაოდ იზრდება.

საინტერესოა განვიხილოთ ძირითადი თერმოდინამიკური მახასიათებლების კონცენტრაციული დამოკიდებულებები ბინარულ რეგულარულ ხსნარებში. ლიტერატურიდან ცნობილია

$$\Delta H_m = \Omega X_1 X_2 \quad (2.95)$$

სადაც Ω შერევის სითბოა (არაა დამოკიდებული კონცენტრაციაზე). ეს განტოლება შეესაბამება პარაბოლის განტოლებას ექსტრემუმით $X_1 = X_2 = 0,5$ წერტილში. ამრიგად, ΔH_m -ის ექსტრემალური მნიშვნელობაა $0,25 \Omega$. კომპონენტების პარციალური ენთალპიების ($\Delta \bar{H}_1$ და $\Delta \bar{H}_2$) განსაზღვრისათვის აუცილებელია (2.95) განტოლების გადაწერა $n_1 + n_2$ მოლელების შემცველი ხსნარისათვის და შემდეგ მისი გადიფერენცირება:

$$\Delta H = \Delta H_m (n_1 + n_2) = \Omega \left[\frac{(n_1 \cdot n_2)}{(n_1 + n_2)} \right] \quad (2.96)$$

აქედან

$$\Delta \bar{H}_1 = \frac{\partial(\Delta H)}{\partial n_1} = \Omega \frac{n_2^2}{(n_1 + n_2)^2} = \Omega X_2^2 = \Omega (1 - X_1)^2 \quad (2.97)$$

$$\Delta \bar{H}_2 = \frac{\partial(\Delta H)}{\partial n_2} = \Omega X_1^2 = \Omega(1 - X_2)^2 \quad (2.98)$$

(2.97) და (2.98) განტოლებების მიხედვით Ω შერევის სითბო.

როცა $X_1 = 1$, გაუტოლდება ΔH_1° -ის ზღვრულ მნიშვნელობას. იმავე განტოლებებიდან, (2.91) ფორმულის გათვალისწინებით, მივიღებთ აქტიურობის კოეფიციენტების კონცენტრაციისაგან დამოკიდებულიების გამოსახულებებს:

$$\ln \gamma_1 = \left(\frac{\Omega}{RT} \right) (1 - X_1)^2, \quad (2.99)$$

$$\ln \gamma_2 = \left(\frac{\Omega}{RT} \right) (1 - X_2)^2 \quad (2.100)$$

ამ გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ როცა $X_2 \rightarrow 0$, მაშინ γ_2 კოეფიციენტი მიისწრაფვის $\gamma_2^{\circ} = e^{\frac{\Omega}{RT}}$ სიდიდისაკენ, ხოლო $\gamma_1 \rightarrow 1$. ამრიგად, რეგულარული ხსნარების თეორიაში მხოლოდ X_2 -ის ნულისგან განსხვავებული მცირე მნიშვნელობებისას არის შესაძლებელი ჰენრის ($\gamma = \text{const}$) და რაულის ($\gamma_1 = 1$) კანონების მიახლოებითი რეალიზაცია.

რეგულარული ხსნარების თეორიის გამოყენებით გაანგარიშების შესაძლებლობების გასარკვევად (2.93) და (2.94) განტოლებებში შევიტანოთ ენთალპიის შესაბამისად ინტეგრალური და პარციალური მნიშვნელობები (2.95), (2.98). ამ გარდაქმნის შედეგად ბინარული ხსნარისათვის მივიღებთ

$$\Delta G_m = \Omega X_1 X_2 + RT(X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2), \quad (2.101)$$

$$\Delta \bar{G}_1 = \Omega(1 - X_1)^2 + RT \ln X_1; \quad \Delta \bar{G}_2 = \Omega(1 - X_2)^2 + RT \ln X_2. \quad (2.102')$$

ამ განტოლებების მიხედვით შესაძლებელია გამოეთვალოთ რეგულარული ხსნარების ყველა ძირითადი თერმოდინამიკური მახასიათებელი, მათ შორის, აქტიურობების კონცენტრაციული და ტემპერატურული დამოკიდებულებები, თუკი ცნობილია ერთი პარამეტრი - შერევის ენერგია Ω . თუ დაუშვებთ, რომ უმარტივეს შემთხვევაში Ω -ს მნიშვნელობა არაა დამოკიდებული ტემპერატურასა და კონცენტრაციაზე, საშუალება გვეძლევა მხოლოდ ერთი ექსპერიმენტული მონაცემის გამოყენებით გამოეთვალოთ შერევის ენერგიის სიდიდე. ასეთი გაანგარიშება შეგვიძლია (2.97) და (2.98) განტოლებების გამოყენებით, თუ ცნობილია $\Delta \bar{H}_1$ მნიშვნე-

ლობა ან (2.99) და (2.100) განტოლებებით. თუ ცნობილია γ -ის ერთი მნიშვნელობა მაინც (მოცემული ტემპერატურის და კონცენტრაციის პირობებში). შესაძარებლად უნდა ითქვას, რომ იდეალური განსავეებული ხსნარების თეორიის გამოყენებით $\Delta\bar{G}_i$ -ს ტემპერატურული დამოკიდებულების საპოვნელად, აუცილებელია ვიცოდეთ γ_i -ის სხვადასხვა ტემპერატურაზე განსაზღვრული ორი მნიშვნელობა მაინც.

ამრიგად, თერმოდინამიკური მახასიათებლების გამოსათვლელად რეგულარულ თეორიას დიდი შესაძლებლობები გააჩნია. მაგრამ იმ სისტემათა რაოდენობა, რომელთა აღწერაც დასაშვები სიზუსტითაა შესაძლებელი ამ თეორიის გამოყენებით (ტემპერატურებისა და კონცენტრაციების ფართო ინტერვალებში), მეტად შეზღუდულია. პრაქტიკაში ამ განტოლებებს იყენებენ ინტერპოლაციური ფორმულების სახით ტემპერატურისა და კონცენტრაციის შეზღუდული ინტერვალებისათვის. ამავე დროს, ისეთნაირად ირჩევენ Ω სიდიდეს (მაგალითად, უმცირესი კვადრატების მეთოდით), რომ მიღებული განტოლებები კარგად ეთანადებოდეს ექსპერიმენტული მონაცემების მთელ ერთობლიობას. დაუშვებელია ასეთი გზით მიღებული დამოკიდებულებების შორეული ექსტრაპოლაცია გამოუკვლევ ტემპერატურებისა და კონცენტრაციებისათვის. მიუხედავად ზემოთქმულისა, ხშირ შემთხვევაში გამართლებულია რეგულარული ხსნარების თეორიის გამოყენება პრაქტიკული ანგარიშებისა და ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავებისათვის. განსაკუთრებით კარგ შედეგებს იძლევა ამ თეორიის გამოყენება ისეთი სისტემებისათვის, რომლებიც კომპონენტთა თვისებების მცირე განსხვავების გამო ხასიათდებიან შედარებით სუსტი ურთიერთქმედებით მაღალ ტემპერატურაზე. რეგულარული ხსნარების თეორიის გამოყენება მთელი რიგი სისტემებისათვის. განსაკუთრებით მათთვის, რომლებიც ხასიათდება ხსნარის სხვადასხვა კომპონენტის ძლიერი ურთიერთქმედებით, მიუღებელია. აღნიშნული ხსნარებისათვის უფრო მოსახერხებელი და გამართლებულია ისეთი მოდელების გამოყენება, როგორცაა: ხსნარების სუბრეგულარული [17], კვაზირეგულარული [1], კვაზიქიმიური [19] და სხვა მოდელები. მათი გამოყენებით გამოთვლილი თერმოდინამიკური ფუნქციები ხასიათდება შედარებით მაღალი სიზუსტით და კარგი დანმთხვევით ექსპერიმენტულ მონაცემებთან. აღნიშნული მოდელები დაწერილებით არის აღწერილი სპეციალურ ლიტერატურაში [7, 10, 17, 19]. ცხრილის სახით მოგვყავს ექსპერიმენტული და გაანგარიშებით მიღებული თერმოდინამიკური მონაცე-

მები რკინის ფუძეზე არსებული თხევადი განზავებული ხსნარებისათვის (ცხრილი 2.3).

2.1.17 ურთიერთქმედების პარამეტრები

რეალურ მეტალურგიულ პროცესებში ქიმიური გარდაქმნები, როგორც წესი, მიმდინარეობს მრავალკომპონენტური ხსნარებში. მაგალითად, ფოლადის აბაზანა წარმოადგენს თხევად რკინაში არალითონების (C, S, H, O, P, N) და მალეგირებელი ელემენტების (Si, Mn, Cr და სხვ.) ხსნარს.

თითოეული კომპონენტის ქიმიური პოტენციალი და, შესაბამისად, აქტიურობა ასეთ ხსნარებში განისაზღვრება არა მარტო მისი კონცენტრაციით, არამედ სხვა გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციებითა და თვისებებით. ეს აუცილებლად უნდა იყოს გათვალისწინებული წონასწორობის გათვლისას. მაგალითად, თხევად ფოლადში გახსნილი გოგირდის აქტიურობა დამოკიდებულია ლითონში ნახშირბადის, სილიციუმის, მანგანუმის და სხვა ელემენტების კონცენტრაციისაგან. C და Si ზრდის გოგირდის აქტიურობას და ამით ხელს უწყობს განგოგირდების პროცესის განხორციელებას, ხოლო მანგანუმი, პირიქით, ამცირებს გოგირდის აქტიურობას. ასეთ სისტემაში, წონასწორობის გაანგარიშების პროცედურის გასამარტივებლად, ვაგნერმა [12] და ჩიპმანმა [20] შემოიღეს ურთიერთქმედების პარამეტრის ცნება.

გახსნილი 2 ნივთიერების აქტიურობის კოეფიციენტის ლოგარითმის ტეილორის მწკრივად გაშლისას, როცა ხსნარი შეიცავს გახსნილი ნივთიერებების X_1 , X_2 , X_3 და ა.შ. მთლიურ წილებს. ელემენტობა 2.102 ფორმულას.

$$\ln \gamma_2(X_1, X_3, X_4, \dots) = \ln \gamma_2^\circ + \left[\frac{X_3 \partial \ln \gamma_2}{\partial X_2} + \frac{X_4 \partial \ln \gamma_2}{\partial X_3} + \frac{X_4 \partial \ln \gamma_2}{\partial X_4} \dots \right] + \left[\frac{1/2 X_3^2 \partial^2 \ln \gamma_2}{\partial X_2^2} + \frac{X_2 X_3 \partial^2 \ln \gamma_2}{\partial X_2 \partial X_3} + \dots \right] \quad (2.102)$$

ამ განტოლებიდან ჩანს, რომ როცა $X_1=0$, $X_4=0, \dots$ და $X_2 \rightarrow 0$, მაშინ $\ln \gamma_2 \rightarrow \ln \gamma_2^\circ$ ე.ი. γ_2° წარმოადგენს სუფთა გამხსნელში მე-2 კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტის ზღვრულ მნიშვნელობას (მუდმივი სიდიდე) და ეს ხსნარი (1-2) ემორჩილება პენრის კანონს.

რკინის ფუძეზე არსებული თხევადი განზაყებული ხსნარებისათვის ექსპერიმენტული და გამოთვლილი თერმოდინამიკური მონაცემები* [7, 27]

გახსნ. ელემ. i	აქტიურობის კოეფიციენტი γ_i^∞ (1873 K)	გახსნის სითბო ΔH_i^∞ , ჯ/მოლი		სუფთა=[i] ₍₁₀₀₎ ΔG_i^∞ გადახელის $\Delta \bar{G}_i^\infty$ (ჯ/მოლი)-ის გამოთვლისათვის რეკომენდებული განტოლება***
		ექსპერიმენტული მონაცემები	ცნობილი მონაცემების მიხედვით გამოთვლილი მონაცემები**	
1	2	3	4	5
Ag	200	-	82400/111700	111700-59.4T
Al	0,049	-62800	-46900/-63600	-62800-23.8T
B	0,040	-73200	-50200/-67800	-73200-12.3T
C _{გრაფ.}	0,57	22600	-/-	22600-42.3T
Ca	2270	-	120500/163200	163200-58.6T
Ce	0,03	-	-54600/-74000	-74000-35.5T
Co	1,07	-	1050/1420	1420-38.9T
Cr	1,0	-	0/0	-37.66T
Ge	0,034	-72000	-/-	-72000-30.2T
Cu	8,6	47200	33500/48800	47200-46.65T
$\frac{1}{2} H_{2(a)}$		36500	-/-	36500-30.46T
Hf	0,0043	-115000	-/-	-115000-31.4T
Mg	43	-	58600/80000	80000-42.9T
Mn	1,3	-	4100/5500	5500-39.1T
Mo	1,0	-	0/0	-42.8T
$\frac{1}{2} N_{2(a)}$	-	10700 (T<1973)	-/-	10700-20.3T (T<1973)
	-	21000 (T>1973)	-/-	21000-15.1T (T>1973)
Ni	0,66	-10000	-6500/-8800	-10000-36.8T
$\frac{1}{2} O_{2(a)}$		-117000	-/-	-117000-2.89T
$\frac{1}{2} P_{2(a)}$		-140000		-140000-9.6T
Pb	850	212500	105000/142000	212500-106.3T
Pd	2,8	22000	16000/21700	22000-46.4T
$\frac{1}{2} S_{2(a)}$		-72000	-/-	-72000-9.92T
Si	0,0013	-131800	-103800/-140600	-131800-17.32T
Sn	2,15	18800	11900/16000	18800-48.5T
Ti	0,037	-69500	-51000/-69500	-69500-27.28T
U	0,027	-	-58200/-78700	-78700-39.4T
V	0,17	-42300	-27600/-37200	-42300-29.2T
W	1,0	-	0/0	-48.1T
Y	0,28	-26800	-/-	-26800-19.2T
Zr	0,014	-80300	-66500/-90000	-80300-34.9T

* - ყველა ელემენტისათვის, ნახშირბადისა და აირების გარდა, სტანდარტულ მდგომარეობად მიღებულია სუფთა თხევადი მდგომარეობა ($T=1873\text{ K}$, $P=1\text{ ატმ}$).

** - მრიცხველში მოყვანილი მონაცემები ნაანგარიშებია (2.91) ფორმულით (ხსნარების რეგულარული თეორია), ხოლო მნიშვნელში კი - (ა) ფორმულით (ხსნარების კვაზირეგულარული თეორია).

*** - განტოლების შედგენისას სარგებლობენ $\Delta\bar{H}_i^\circ$ -ის ექსპერიმენტული (ძირითადად კალორიმეტრიული) მონაცემებით, ხოლო თუ ეს მონაცემები არ არსებობს, $\Delta\bar{H}_i^\circ$ სიდიდეს ანგარიშობენ γ_i° -ის ცნობილი მნიშვნელობის მიხედვით, ხსნარების კვაზირეგულარული თეორიის ფორმულის გამოყენებით: $\Delta\bar{H}_i^\circ = \frac{\tau \cdot RT \ln \gamma_i^\circ}{\tau - 1}$ (ა), სადა τ ტემპერატურული უდმეცხა და რკინის ნაღვლობებისათვის 7150±2000-ის ტოლია.

ჩვეულებრივად, პრაქტიკულ ანგარიშებში, შესაძლებელია შემოვიფარგლოთ (2.102) განტოლების მხოლოდ პირველი რიგის წევრებით. ამ წევრების წარმოებულები წარმოადგენს სწორედ პირველი რიგის ურთიერთქმედების პარამეტრებს. ისინი აღინიშნება შემდეგნაირად:

$$\varepsilon_2^{(2)} = \frac{\partial \ln \gamma_2}{\partial X_2}; \quad \varepsilon_2^{(3)} = \frac{\partial \ln \gamma_2}{\partial X_3}; \quad \varepsilon_2^{(4)} = \frac{\partial \ln \gamma_2}{\partial X_4}.$$

აქედან გამომდინარე, (2.102) განტოლება შეიძლება წარმოვიდგინოთ მარტივი სახით

$$\ln \gamma_2(X_2, X_3, X_4 \dots) = \ln \gamma_2^\circ + \varepsilon_2^{(2)} \cdot X_2 + \varepsilon_2^{(3)} \cdot X_3 + \varepsilon_2^{(4)} \cdot X_4 \dots \quad (2.103)$$

ასეთი მიახლოებისას გახსნილი ნივთიერების (2) აქტიურობის კოეფიციენტის ლოგარითში წარმოადგენს კონცენტრაციის წრფივ ფუნქციას. პარამეტრი $\varepsilon_2^{(2)}$ ახასიათებს (2) კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტის დამოკიდებულებას საკუთარი კონცენტრაციისგან, ხოლო $\varepsilon_2^{(3)}, \varepsilon_2^{(4)}$ - სხვა გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციებისგან. (2.103) განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ როცა $X_3 = X_4 \dots = 0$ $\varepsilon_2^{(2)} X_2 = \gamma_2(X_2, X_3=0, X_4=0 \dots) / \gamma_2^\circ$ ანალოგიურად, $X_2 = X_4 \dots = 0$ $\varepsilon_2^{(3)} X_3 = \ln[\gamma_2(X_2=0, X_3, X_4=0 \dots) / \gamma_2^\circ]$ და ა.შ.

აქედან:

$$\begin{aligned} \ln \gamma_2^\circ(X_2, X_3, X_4 \dots) = & \ln \gamma_2^\circ + \ln[\gamma_2(X_2, X_3=0, X_4=0 \dots) / \gamma_2^\circ] + \\ & + \ln[\gamma_2(X_2=0, X_3, X_4=0 \dots) / \gamma_2^\circ] + \dots \end{aligned}$$

ამ განტოლების პირველი ორი წევრის ჯამი უდრის $\ln \gamma_2(X_2, X_3=0, X_4=0\dots)$ სიდიდეს. თუ განტოლების სხვა წევრების $\gamma_2^{(i)}/\gamma_2$ ფარდობას აღვნიშნავთ $f_2^{(3)}, f_2^{(4)} \dots$ -ით, მაშინ

$$\gamma_2(X_2, X_3, X_4 \dots) = \gamma_2(X_2, X_3=0, X_4=0\dots) f_2^{(3)} f_2^{(4)} \quad (2.104)$$

ამ განტოლებაში პირველი თანამამრაველია ბინარულ (1-2) ხსნარში მე-2 კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტი X_2 კონცენტრაციისას, ხოლო დანარჩენები – იმავე კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტებია 1-2-3, 1-2-4 ხსნარებში, რომლებშიც $X_3 \rightarrow 0$.

ვაგვიჩვენებთ გამოიყვანა უბრალო დამოკიდებულება, რომელიც გამოსახავს მრავალკომპონენტიან ხსნარში i კომპონენტის გავლენას j -ზე და j კომპონენტისას i -ზე

$$\varepsilon_i^{(j)} = \varepsilon_j^{(i)} \quad (2.105)$$

თუ სტანდარტულ მდგომარეობად ავირჩევთ უსასრულოდ განზავებულ ხსნარს, რომლისთვისაც მე-2 კომპონენტის აქტიურობის კოეფიციენტის ზღვრული მნიშვნელობა ერთის ტოლია, მივიღებთ

$$\ln \varphi_2(X_2, X_3, X_4 \dots) = X_2 \varepsilon_2^{(2)} + X_3 \varepsilon_3^{(3)} + X_4 \varepsilon_4^{(4)} + \dots \quad (2.106)$$

$$\varphi_2(X_2, X_3, X_4 \dots) = f_2^{(3)} f_2^{(4)} \quad (2.107)$$

ფ აქტიურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობაა უსასრულოდ განზავებული ხსნარისათვის, როცა კონცენტრაცია გამოსახულია მოლურ წილებში.

როგორც ადრე აღვნიშნეთ, განზავებული ხსნარებისათვის კონცენტრაციის მნიშვნელობები, გამოხატული ნებისმიერ ერთეულებში, ერთმანეთის პროპორციულია. პრაქტიკული ანგარიშებისათვის უფრო მოხერხებულია კონცენტრაცია გამოისახოს მასური პროცენტებით, ხოლო ნატურალური ლოგარითმი – ათობითით. ამ შემთხვევაში (2.106) და (2.107) განტოლებები შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\lg f(\%C_2, \%C_3, \%C_4 \dots) = \varepsilon_2^{(2)}(\%C_2) + \varepsilon_3^{(3)}(\%C_3) + \varepsilon_4^{(4)}(\%C_4) \quad (2.108)$$

$$f(\%C_2, \%C_3, \%C_4 \dots) = f_2^{(3)} f_2^{(4)}, \quad (2.109)$$

სადაც f_2 - აქტიურობის კოეფიციენტი უსასრულოდ განზავებულ ხსნარში (1-2). სტანდარტულ მდგომარეობად მიღებულია მე-2 კომპონენტის 1 %-იანი ხსნარი (ძალაშია ჰენრის კანონი).

$C_2, C_3,$ და C_4 შესაბამისი კომპონენტების კონცენტრაციებია გამოსახული მასურ პროცენტებში, ხოლო $e_i^{(j)} = \rho |x_{ij}| / d | \% C |$ და ა.შ. – ურთიერთქმედების პარამეტრები. (2.110)

დამოკიდებულება $e_i^{(j)}$ და $e_j^{(i)}$ ურთიერთქმედების პარამეტრებს შორის გამოიხატება შემდეგი განტოლებით:

$$e_i^{(j)} = e_j^{(i)} 230 M_i / M_j + 1 - M_j / M_i. \quad (2.111)$$

$M_i, M_j, M_j - a$ (გამხსნელი), i და j კომპონენტების მოლეკულური მასაა.

თუ გამხსნელი რკინაა, მაშინ:

$$e_i^{(j)} = e_j^{(i)} M_j / 0,2425; \text{ ხოლო } e_i^{(j)} = M_i / M_j \cdot e_i^{(j)} \quad (2.112)$$

ცხრილი 2.4

1873 K-ზე რკინაში გახსნილი ელემენტების ურთიერთქმედების პირველი რიგის პარამეტრთა მნიშვნელობები $e_i^{(j)} \cdot 100$ [28]

i ელემენტი	j ელემენტი											
	Al	B	C	Ca	Co	Cr	Cu	H	Mn	Mo	N	Nb
Al	4,5	-	9,1	4,7	-	-	-	24	-	-	-5,8	-
B	-	3,8	22	-	-	-	-	49	-	-	7,4	-
C	4,3	24	14	-9,7	0,76	-2,4	1,6	67	-1,2	-0,83	11	-6
Ca	-7,2	-	-34	(-0,2)	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	-	-	2,1	-	0,22	-2,2	-	-14	-	-	3,2	-
Cr	-	-	-12	-	-1,9	-0,03	1,6	-33	-	0,18	-19	-
Cu	-	-	6,6	-	-	1,8	2,3	-24	-	-	2,6	-
H	1,3	5	6	-	0,18	-0,22	0,05	0	-0,14	0,22	-	-0,23
Mn	-	-	-7	-	-	-	-	-31	0	-	-9,1	-
Mo	-	-	-9,7	-	-	0,03	-	-20	-	-	-10	-
N	-2,8	9,4	13	-	1,1	-4,7	0,9	-	-2	-1,1	0	-6
Nb	-	-	-49	-	-	-	-	-61	-	-	-42	(0)
Ni	-	-	4,2	-6,7	-	-0,03	-	-25	-	-	2,8	-
O	-390	-260	-45	-	0,8	-4	-1,3	-310	-2,1	0,35	5,7	-14
P	-	-	13	-	-	-3	2,4	21	0	-	9,4	-
Pb	2,1	-	6,6	-	0	2	-2,8	-	-2,3	0	-	-
S	3,5	13	11	-	0,26	-1,1	-0,84	12	-2,6	0,27	1	-1,3
Si	5,8	20	18	-6,7	-	-0,03	1,4	64	0,2	-	9	-
Sn	-	-	37	-	-	1,5	-	12	-	-	2,7	-
Ta	-	-	-37	-	-	-	-	400	-	-	-47	-
Ti	-	-	-	-	-	5,5	-	-110	-	-	-180	-
V	-	-	-34	-	-	-	-	-59	-	-	-35	-
W	-	-	-15	-	-	-	-	8,8	-	-	-7,2	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-410	-

2.4 და 2.5 ცხრილებში მოყვანილია 1873 K-ზე რკინაში გახსნილი ზოგიერთი ელემენტის ურთიერთქმედების პირველი რიგის პარამეტრთა მნიშვნელობები $e_i^{(j)} \cdot 100$.

ცხრილი 2.5

1873 K-ზე რკინაში გახსნილი ელემენტების ურთიერთქმედების პირველი რიგის პარამეტრთა მნიშვნელობები $e_i^{(j)} \cdot 100$ [28]

i ელემენტი	j ელემენტი											
	Ni	O	P	Pb	S	Si	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Al	-	-600	-	0.65	3	0.56	-	-	-	-	-	-
B	-	-180	-	-	4.8	1.8	-	-	-	-	-	-
C	1.2	-34	5.1	0.79	4.6	8	4.1	-2.1	-	-7.7	-0.56	-
Ca	-4.4	-	-	-	-	-9.7	-	-	-	-	-	-
Co	-	1.8	-	0.3	0.11	-	-	-	-	-	-	-
Cr	0.02	-14	-5.3	0.83	-2	-0.43	0.9	-	5.9	-	-	-
Cu	-	-6.5	4.4	-0.56	-2.1	2.7	-	-	-	-	-	-
H	0	-19	1.1	-	0.8	2.7	0.53	-2	-1.9	-0.7	0.48	-
Mn	-	-8.3	-0.35	-0.3	-4.8	0	-	-	-	-	-	-
Mo	-	-0.07	-	0.23	-0.05	-	-	-	-	-	-	-
N	1	5	4.5	-	0.7	4.7	0.7	-3.2	-5.3	-9.3	-0.15	-6.3
Nb	-	-83	-	-	-4.7	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0.09	1	-0.35	-0.23	-0.37	0.57	-	-	-	-	-	-
O	0.6	-20	7	-	-13.3	-13.1	-1.11	-	-60	-30	0.85	(300)
P	0.02	13	6.2	1.1	2.8	12	1.3	-	-	-	-	-
Pb	-1.9	-	4.8	-	-32	4.8	5.7	-	-	-	-	-
S	0	-27	29	-4.6	-2.8	6.3	-0.44	-0.02	-7.2	-1.6	0.97	-5.2
Si	0.5	-23	11	1	5.6	11	1.7	-	-	2.5	-	-
Sn	-	-11	3.6	3.5	-2.8	5.7	0.16	-	-	-	-	-
Ta	-	-	-	-	-2.1	-	-	-	-	-	-	-
Ti	-	-180	-	-	-11	-	-	-	1.3	-	-	-
V	-	-97	-	-	-2.3	4.2	-	-	-	1.5	-	-
W	-	5.2	-	0.05	3.5	-	-	-	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-

2.1.18 ხსნარების მონაწილეობით მიმდინარე რეაქციების წონასწორობის ანგარიში

საინტერესოა გამოვიანგარიშოთ ლეგირებულ რკინაში აზოტის წონასწორობის კონცენტრაცია 1600 °C ტემპერატურისა და $P_{N_2} = 1$ ატ წნევის პირობებისათვის. ბუნებრივია, რომ აზოტის მოცულობის წნევისას მისი აქტიურობა სუფთა და ლეგირებულ რკინაში ერთი და იგივე უნდა იყოს. ამავე დროს, აზოტის მალეგირებულ

ელემენტებთან და რკინასთან სხვადასხვანაირი ურთიერთქმედების გამო შესაბამისად იცვლება აზოტის აქტიურობის კოეფიციენტი. ეს შელაუნდება აზოტის კონცენტრაციების სხვაობაში შენადნობსა $[N]_0$ და სუფთა რკინაში $[N]_{Fe}$. აზოტის წნევის P_{N_2} მუდმივობისას და იმის დაშვებით, რომ აზოტი რკინაში განზაეებულ მდგომარეობაშია, მივიღებთ $a_N = [N]_{Fe} = f_N^0 [N]_0$.

ჩავატაროთ ანგარიში Cu, Mn და Ni-ით ლეგირებულ რკინაში განზაეებულ აზოტის ხსნარისათვის. Fe-Cr-Mn შენადნობში (2.109) განტოლების მიხედვით $a_N = [N]_{Fe} = f_N^{Cr} \cdot f_N^{Mn} \cdot [X]_0$, ხოლო (2.110) ყოვრ-მულიდან $\lg f_i^j = e_i^j [\%j]$. 1600 °C-ზე თხევად რკინაში $e_N^{(Cr)} = -0.042$; $e_N^{(Mn)} = -0.02$ და $e_N^{(Ni)} = 0.01$ (იხ. ცხრ. 2.4 და 2.5). ამრიგად, შენადნობისათვის, სადაც 80 % [Fe], 5 % [Cr] და 15 % [Mn], $\lg f_N = (-0.042 \cdot 5) + (-0.02 \cdot 15) = -0.51 = \bar{1}.49$ ანუ $f_N = 0.31$. ვინაიდან ამ ტემპერატურისა და $P_{N_2} = 1$ ატ წნევის პირობებისათვის თხევად რკინაში $[N]_{Fe} = 0.043$. ამიტომ $0.043 = [N]_0 \cdot 0.31$ და $[N]_0 = 0.139$. აზოტის რაოდენობის ასეთი ზრდა გამოწვეულია ნაღლობში Mn-სა და Cr-ის არსებობით, რომლებიც საგრძნობლად ამცირებს აზოტის აქტიურობას თხევად რკინაში ($e_N^{(Cr)}$ და $e_N^{(Mn)}$ სიდიდეები უარყოფითია). Ni-ის შემოხვევაში $e_N^{(Ni)}$ სიდიდე დადებითია და ამიტომ ნიკელის მონაწილეობისას აზოტის წონასწორული კონცენტრაცია რკინაში კლებულობს.

გამოეთვალათ $\lg f_N(N, Cr, Ni)$ და $[N]_0$ მნიშვნელობა 1600 °C ტემპერატურისა და $P_{N_2} = 1$ ატ წნევისას, როცა ლითონი შეიცავს 70 % [Fe], 5 % [Cr] და 25 % [Ni]. გვექნება $\lg f_N(N, Cr, Ni) = -0.042 \cdot 5 + 0.01 \cdot 25 = +0.04$. აქედან $f_N = 1.1$ და $[N]_0 = 0.043 \cdot 1.1 = 0.039\%$.

მაღეგირებელი ელემენტები. რომელთა სწრაფვა აზოტის მიმართ უფრო მაღალია, ამცირებს მისი აქტიურობის კოეფიციენტს რკინაში ($e_N < 0$), ხოლო ის ელემენტები, რომელთა სწრაფვაც ნაკლებია, ზრდის f_N -ს ($e_N > 0$). მაგალითად, ისეთი ელემენტები, როგორცაა რკინასთან ძლიერად ურთიერთმოქმედი Si, აგრეთვე ზრდის f_N -ის მნიშვნელობას.

ფოლადში მყოფი მაღეგირებელი ელემენტები ცვლის ნაღლობში გახსნილი ყველა კომპონენტის აქტიურობას, კერძოდ, ნახშირბადისა და გოგირდის. მაღეგირებელი ელემენტების C, N, S-ის და სხვა არალითონების აქტიურობაზე გავლენის შეფასე-

ბისას, აუცილებლადაა მხედველობაში მისაღები მალეგირებელი ელემენტების რკინის მიმართ სწრაფვა. მაგალითად, Si, რომელიც რკინასთან მტკიცე სილიციდებს წარმოქმნის, საგრძნობლად ზრდის სხვა გახსნილი ნივთიერების აქტიურობას. ასე ვთქვათ, გამოდევნის მათ ხსნარიდან.

იმ რეაქციის წონასწორობის გამოსაანგარიშებლად, რომლის მიმდინარეობისას ერთი ან რამდენიმე რეაგენტი იმყოფება ხსნარში, არაა საკმარისი ვიცოდეთ რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებების ურთიერთქმედების სტანდარტული გიბსის ენერგია. აუცილებელია არსებობდეს მონაცემები ხსნარში მყოფი რეაგენტების აქტიურობის კოეფიციენტების შესახებ. თუ კი ასეთი მონაცემები არის ან შესაძლებელია მათი თეორიული გაანგარიშება, მაშინ წონასწორობის პარამეტრების განსაზღვრა საკმაოდ იოლია. მაგალითისათვის გამოვთვალოდ $P_0=10^6$ ატ წნევისა და $T=1873$ K ტემპერატურის პირობებისათვის კორუნდის ტიგელში რკინის ვაკუუმური დნობისას ლითონში გახსნილი ალუმინის კონცენტრაცია. პირველ რიგში ფაზათა წესის გამოყენებით შევამოწმოთ დასმული ამოცანის სისწორე. ჩვენს შემთხვევაში სისტემა შეიცავს სამ კომპონენტს: რკინას, ალუმინს და აირად ჟანგბადს ($\nu=3$) და სამ ფაზას: თხევადს, მყარს და აირადს ($\phi=3$). ასეთ სისტემაში მუდმივი ტემპერატურის პირობებში დამოუკიდებლად ცვლადი სიდიდეების რაოდენობა განისაზღვრება ფიზიკური ქიმიის კურსიდან ცნობილი განტოლების საშუალებით $t=\nu-\phi+1=1$ (t - თავისუფლების ხარისხი).

ეს ნიშნავს, რომ ასეთ სისტემაში შეგვიძლია ნებისმიერად ავირჩიოთ მხოლოდ ერთი პარამეტრი, მაშინ როცა სხვა მახასიათებლები უნდა იყოს განსაზღვრული. განხილულ მაგალითში ნებისმიერად არჩეულ პარამეტრად შესაძლებელია ჩავთვალოთ ჟანგბადის წნევა.

სუფთა ალუმინის დაჟანგვის რეაქციისათვის



2.2 ცხრილში მოყვანილი განტოლების საშუალებით $\Delta G^\circ = -1681000 + 324 T$, ჯგ. (2.114)

შესაძლებელია გამოვთვალოთ გიბსის ენერგიის ცვლილება რეაქციის იზოთერმის (2.28^o) მიხედვით მივიღებო

$$\lg K = \lg \frac{1}{\gamma_{Al} X_{Al}^2 P_{O_2}^{3/2}} = \frac{1681000 - 324T}{19;15T} \quad (2.115)$$

ალუმინის საძიებო კონცენტრაციის გამოსათვლელად საჭიროა მხოლოდ განისაზღვროს γ_{Al} მნიშვნელობა. ჩვენ შემთხვევაში ამ სიდიდის უგულებელყოფა დაუშვებელია, ვინაიდან ალუმინის ხსნარი თხევად რკინაში ხასიათდება მნიშვნელოვანი გადახრებით სრულყოფილი ხსნარის თვისებებიდან. თუ დაეუშვებთ, რომ საქმე გვაქვს იდეალურ განზავებულ ხსნართან, სადაც 1873 K ტემპერატურაზე $\gamma_{Al}'' = 0,049$ (იხ. ცხრ. 2.3), მაშინ (2.115) განტოლებიდან მივიღებთ $X_{Al} = 6,2 \cdot 10^{-10}$ ანუ ($3 \cdot 10^{-8}$ მას. %). ეს მონაცემები (X_{Al} -ის მცირე რიცხოვრივი მნიშვნელობა) კარგად ეთანადება განზავებული ხსნარისათვის მიღებულ დაშვებას და სრული უყვლება გვაქვს დაკმაყოფილდეთ მიღებული შედეგით. თუკი X_{Al} -ის მიღებული სიდიდე აღმოჩნდებოდა იმ დიაპაზონს გარეთ, სადაც ხსნარი ითვლება განზავებულად, მაშინ ვისარგებლებდით რა γ_{Al} შეფასების სხვა მეთოდით, თავიდან გამოვთვლით X_{Al} მნიშვნელობას. მაგალითად, თუ წნევაა $P_{O_2} = 10^{-17}$ ატმ, მაშინ ზემოთ მოყვანილი საანგარიშო სქემის მიხედვით მივიღებთ, რომ $X_{Al} = 0,11$ (5,3 მას. %). ალუმინის ასეთი კონცენტრაციისას უფრო გამართლებულია γ_{Al} სიდიდე შევაფასოთ ურთიერთქმედების პარამეტრის საშუალებით. რკინაში გახსნილი ალუმინისათვის $e_{Al}^{(Al)} = 0,045$

(ცხრ. 2.4). მაშინ $\lg f_{Al} = 0,045 \cdot 5,3 = 0,24$; $f_{Al} = \frac{\gamma_{Al}}{\gamma_{Al}''} = 1,74$; $\gamma_{Al} = 0,049 \cdot 1,74 = 0,085$. ბუნებრივია, γ_{Al} სიდიდეთა შორის ასეთი დიდი სხვაობა უნდა იქნეს გათვალისწინებული ანგარიშებში. ჩვენს ანგარიშში გამოვიყენეთ პირველი რიგის ურთიერთქმედების პარამეტრი, უფრო ზუსტი ანგარიშისათვის სასურველია მეორე რიგის პარამეტრის გამოყენებაც.

ჩატარებულ ანგარიშებში გამოყენებული 1873 K ტემპერატურისათვის ცნობილია ცხრილში მოყვანილი თერმოდინამიკური მონაცემები. სხვა ტემპერატურაზე ანალოგიური ანგარიშების ჩასატარებლად საჭიროა γ_i'' და e_i' ტემპერატურული დამოკიდებულებების განტოლების გამოყენება (იხ. ცხრ. 2.3). თუკი ეს მონაცემებიც არ არსებობს, მაშინ შესაძლებელია ვისარგებლოთ რეგულარული ხსნარების თეორიიდან გამომდინარე (2.92) განტოლებით.*

(2.92) ფორმულის ანალოგიური დამოკიდებულება შეიძლება გამოვიყენოთ f_i -ს გამოსათვლელადაც. ამ შემთხვევაში საწყის

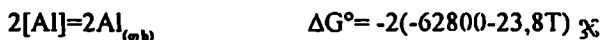
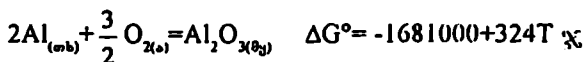
* აქ არ ვახსენებთ ხსნარების კვაზი- და სუბრეგულარული თეორიებიდან გამომდინარე ანალოგიურ ფორმულებს.

(2.91) განტოლებაში შემავალი $\Delta \bar{H}_i$ შეესაბამება 1 %-იანი განზავებული ხსნარიდან (არა სუფთა ნივთიერებიდან) 1 მოლი i კომპონენტის ხსნარში გადასვლის სითბოს.

აირად ჟანგბადსა და რკინაში გახსნილ ალუმინს შორის წონასწორობის გამოთვლისას სტანდარტულ მდგომარეობად მიღებული იყო სუფთა თხევადი ალუმინი. თუ ჩვენ დაგვიანტერესებდა წონასწორობა ლითონში გახსნილ ჟანგბადსა და ალუმინს შორის, მაშინ ჟანგბადისათვის მსგავსი სტანდარტული მდგომარეობის შერჩევა საკმაოდ მოუხერხებელი იქნებოდა. იმ ნივთიერებებისათვის, რომლებიც ფოლადის დნობის პროცესში წარმოადგენენ აირებს, სტანდარტულ მდგომარეობად ჩვეულებრივ ირჩევენ იდეალურ განზავებულ ხსნარს (1 %-იანი კონცენტრაციისას). ასეთივე სტანდარტულ მდგომარეობას ირჩევენ სხვა რეაგენტებისათვისაც. ამ შემთხვევაში წონასწორობის კონსტანტის გამოსახულებაში შეაქვთ ნივთიერებების პროცენტული კონცენტრაციები და აქტიურობის კოეფიციენტები - f_i , რომლებიც ითვალისწინებენ ხსნარის გადახრას იდეალურისაგან. მთელ რიგ შემთხვევებში (მცირე კონცენტრაციებისას) დასაშვებია ამ კოეფიციენტების უგულებელყოფა. მაგალითისათვის გამოეთვალეთ ქვემოთ მოყვანილი რეაქციის წონასწორობა:



ბუნებრივია, რომ ამ რეაქციის ΔG° განსხვავდება (2.113) რეაქციის ΔG° -გან და ეს სხვაობა, ერთი სტანდარტული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის (ალუმინისათვის და ჟანგბადისათვის) გიბსის ენერჯის ტოლია. (2.116) რეაქციის ΔG -ს საპოვნელად საჭიროა შევაჯამოთ (2.114) და ქვემოთ მოყვანილი განტოლებები, რომლებიც აღებულია 2.3 ცხრილიდან.



აქედან ვღებულობთ წონასწორობის მუდმივას გასაანგარიშებელ გამოსახულებას

$$\lg K = \lg \frac{1}{f_{Al}^2 [\%Al]^2 \cdot f_O^3 [\%O]^3} = \frac{1204400 - 380,27T}{19,15T} \quad (2.117)$$

განვსაზღვროთ ალუმინის კონცენტრაცია, რომელიც უსრუნიველყოფს ნაღვლობში არა უმეტეს 0.003 % ჟანგბადის (1873 K) შემცველობას. დაეუშვათ. რომ $f_{Al}=1=f_o=1$. მაშინ (2.117) განტოლებიდან ვღებულობთ $[Al]=0.0006$ %. ალუმინისა და ჟანგბადის კონცენტრაციების სიმცირის გამო შეგვიძლია აღნიშნული ხსნარი ჩავთვალოთ განსაყვებულად. წინააღმდეგ შემთხვევაში, აგრეთვე, როცა $T \neq 1873$ K, იძულებული ვიქნებოდით f_{Al} და f_o -ს კონცენტრაციული და ჟანგბადის ტემპერატურული დამოკიდებულებების შეტანით გაგვერთულებინა (2.117) საანგარიშო განტოლება (როგორც წინა შემთხვევაში). თუ რკინის, ალუმინის და ჟანგბადის გარდა ნაღვლობში სხვა ელემენტებიცაა, მაშინ აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ მათი გავლენა f_{Al} და f_o -ზე.

თ ა ე ი II

ფოლადსადნობი წარმოების წიდები

წიდა წარმოადგენს მრავალკომპონენტოიან ოქსიდურ ნაღვლობს, რომელიც უშუალო კონტაქტშია ლითონურ აბაზანასთან და ასრულებს მნიშვნელოვან ტექნოლოგიურ ფუნქციას. წიდების თეორიის განვითარება დაკავშირებულია პ. შენკის, ვ. ვანიუკოვის, პ. გერასიმენკოს, მ. ტომკინის, ლ. შვარცმანის, ო. ესინის და სხვა მრავალი მეცნიერის შრომებთან. წიდების თერმოდინამიკურ თვისებათა აღწერის პირველი მცდელობა ვერდნობოდა მოსაზრებას, რომ წიდების ძირითად სტრუქტურულ ერთეულს წარმოადგენს ოქსიდური მოლეკულები (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO და სხვ.), აგრეთვე სულფიდები, ფოსფატები, სილიკატები და სხვა რთული ნაერთები. ამის საფუძველზე შეიქმნა წიდების მოლეკულური ანუ ქიმიური თეორია. მას ჯერ კიდევ წარმატებით იყენებენ წიდების თვისებათა მარტივი რაოდენობრივი აღწერისათვის, მაგრამ მოლეკულური მოდელი ვერ ხსნის წიდების ზოგიერთ ფიზიკურ თვისებას. მაგალითად, ელექტროგამტარობას, რომლის დამაკმაყოფილებელ ინტერპრეტაციას იძლევა ელექტროლიტური დისოციაციის თეორია. აქედან გამომდინარე, ზოგიერთმა მეცნიერმა (ო. ესინი, პ. გელდი, მ. ტომკინი, ლ. შვარცმანი და სხვ.) შეიმუშავა და ჩამოაყალიბა წიდების უფრო სრულყოფილი იონური მოდელი. ამ მოდელის გამოყენებამ ახსნა მრავალი ექსპერიმენტული ფაქტი და ხელი შეუწყო წიდების ელექტროქიმიური საფუძვლების შექმნას.

წიდეების რაოდენობრივი თეორიის განვითარებაში დიდი როლი ითამაშა სტატისტიკური თერმოდინამიკის გამოყენებამაც. წიდეების თეორიის შემდგომი განვითარებისათვის ძალზე პერსპექტიულადაა მიჩნეული ბოლო ხანებში დამკვიდრებული მოსაზრება წიდეების კოლექტიურ ელექტრონულ სისტემად წარმოდგენის შესახებ. ვინაიდან, ყველა ქიმიური კავშირი ხორციელდება ელექტრონების საშუალებით, ამიტომ წიდეების თეორიის ცენტრალური საკითხი, რომელიც ეხება ატომთა შორის ურთიერთქმედებას, საბოლოო ჯამში დაკავშირებულია წიდეების ელექტრონულ აგებულებასთან. ამ უკანასკნელის გათვალისწინება რაოდენობრივ თეორიას წარმოგვიდგენს, როგორც უფრო თანმიმდევრულს და მთელ რიგ შემთხვევაში განაპირობებს თვისობრივად სრულიად ახალი შედეგების მიღებას.

2.2.1. წიდეების ტექნოლოგიური ფუნქციები და მახასიათებლები

წიდეების უმნიშვნელოვანეს ფუნქციას წარმოადგენს მავნე მინარეების – გოგირდის, ფოსფორისა და ზოგიერთი სხვა ელემენტის სორბცია (შთანთქმა). წიდის შთანთქმის უნარი დამოკიდებულია მის შედგენილობაზე, ტემპერატურასა და ლითონი-წიდის სისტემის განუანგვის ხარისხზე. მაგალითად, გოგირდის მოშორება კარგად მიმდინარეობს განუანგულ სისტემაში, ფოსფორის – დაუანგველ პირობებში. პროცესებისათვის, რომლებიც ელექტროკალურ ან სხვა ღია ფოლადსადნობ ღუმელებში მიმდინარეობს, დიდი მნიშვნელობა აქვს წიდის დამცველ (საფარ) თვისებებს. წიდის აირშედწევადობაზე დიდადაა დამოკიდებული აირების (H_2 , N_2 , O_2) შემცველობა თხევადი ლითონის აბაზანაში და დაუანგვის პროცესების განვითარება. წიდეებში მასის გადატანის პროცესები დაკავშირებულია მინარეების დიფუზიურ ძვრადობასთან, წიდის სიბლანტესთან, მის შედგენილობასთან.

ელექტროფოლადსადნობ პროცესებში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს წიდის ფენაში გამავალი დენის სითბური და ელექტროქიმიური ზემოქმედება. მაგალითად, ელექტროწილური გადადნობის პროცესებში წიდა ასრულებს გამახურებელი ელემენტის ფუნქციას, ხოლო მუდმივი დენის გატარების შემთხვევაში ადგილი აქვს ელექტროქიმიურ ეფექტებსაც. გარდა ამისა, წიდეები ხელს უწყობს სითბური რეჟიმის სტაბილიზაციას, სხმულის უდევებტო

ზედაპირის წარმოქმნას და სხვ. ვაკუუმურ-რკალური გადადნობის პროცესში წიდის მცირე დანამატები უზრუნველყოფს არალითონური ჩანართების ასიმილაციას და მოშორებას.

წიდის ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელია ფუძიანობა, რომელსაც განსაზღვრავს ფუძე და მჟავა ჟანგეულების ჯამური კონცენტრაციების ფარდობა. უმარტივეს შემთხვევაში წიდის ფუძიანობას განსაზღვრავენ CaO/SiO_2 ფარდობის სიდიდით. სამეცნიერო ლიტერატურაში ჯერ კიდევ არაა ცალსახად დადგენილი ფუძიანობის მაჩვენებელი რაიმე უნივერსალური სკალა. ამის გამო, ზოგად შემთხვევაში სარგებლობენ მარტივი კრიტერიუმებით. ასე მაგალითად, წიდის ფუძიანობის ყველაზე მარტივი განსაზღვრელი კრიტერიუმია მასში ჟანგბადის იონის აქტიურობა, მაგრამ ხშირ შემთხვევაში ამ მაჩვენებლებით განსაზღვრული ფუძიანობის მნიშვნელობა არ ეთანხმება სხვა მაჩვენებლით, მაგალითად, განვითარების უნარით (ცნობილია, რაც უფრო ფუძიანია წიდა, მით უფრო მაღალია განვითარებელი თვისებები) განსაზღვრულ მნიშვნელობას. წიდის თვისებების კონცენტრაციისგან დამოკიდებულების უფრო ზუსტ სურათს იძლევა ხსნარების თერმოდინამიკური თეორიის საფუძველზე გამოყვანილი ფორმულები.

წიდის ფუძიანობის ცნება ფართოდ გამოიყენება პრაქტიკულ მეტალურგიაში. მაღალფუძიანი წიდები ხასიათდება მაღალი სორბციული (შთანთქმითი) თვისებებით მინარევების მიმართ, თხევადდენადობითა და აირშედწევადობით, რითაც ხელს უწყობს ელექტრული რკალის სტაბილიზაციას. ეს წიდები ითვლება "მოკლე" წიდებად ანუ გააჩნია თხევადი მდგომარეობიდან მყარში გადასვლის მოკლე ტემპერატურული ინტერვალი. იგივე პირობებში მჟავე წიდები უფრო ბლანტია, ხასიათდება კარგი საიზოლაციო თვისებებით და მყარიდან თხევად მდგომარეობაში გადასვლის დიდი ტემპერატურული შუალედით ("გრძელი" წიდები).

ფოლადსადნობი წიდების ფიზიკური თვისებების მთავარი განმსაზღვრელი ფაქტორებია მათი ზედაპირული დაჭიმულობა, სიბლანტე, სიმკრივე და ელექტროგამტარობა.

წიდის სიბლანტე გავლენას ახდენს ფოლადსადნობ აბაზანაში მიმდინარე პროცესების სიჩქარეზე. ელექტროფოლადსადნობი წიდების სიბლანტე $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე მერყეობს $0,01-0,06$ პა.წმ ზღვრებში ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე წყლის სიბლანტეა $0,9$ მპა.წმ, ხოლო ფოლადისა $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე -25 მპა.წმ). სიბლანტე დიდადაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

ფოლადსადნობი წიდების სიმკრივე $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე მერყეობს $3,5-2,2$ გ/სმ³ ზღვრებში. ერთი და იგივე პირობებში ფუძე წიდების სიმკრივე უფრო მაღალია, ვიდრე - მჟავე წიდებისა. ტემპერატურის ზრდით წიდების სიმკრივე იკლებს $0,2$ გ/სმ³-ით ყოველ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე.

წილების ელექტროგამტარობა დამოკიდებულია მათ შედგენილობაზე. ჩვეულებრივად, წილების ელექტროგამტარობა 1600 °C-ზე მერყეობს 0,0001–1 ომ³სმ⁻¹ ფარგლებში. ფუძე წილების ელექტროგამტარობა უფრო მაღალია და მეტად იზრდება ტუტე ლითონების ოქსიდებისა და ჰალოგენიდების, კერძოდ, მდნობი შპატის დამატებით. ელექტროგამტარობა ისევე, როგორც თხევადდენადობა, მატულობს ტემპერატურის ზრდით $\eta = A \cdot X e^{-E/RT}$, სადაც A – მოცემული წილის მუდმივაა, E – ელექტროგამტარობის აქტივაციის ენერგია.

მოყვანილი მონაცემები საორიენტაციოა, ვინაიდან, უმეტეს შემთხვევაში, საწარმოო დანადგარზე შეუძლებელია სრულყოფილად გამეორდეს ის ლაბორატორული პირობები, რომლებშიც ხორციელდება ფიზიკურ-ქიმიური გასომევები.

2.2.2. წილების მოლეკულური თეორია

წილების მოლეკულური ანუ ქიმიური თეორია წარმოადგენდა წილების თვისებებისა და ქცევის შესახებ პრაქტიკულ მეტალურგიაში დაგროვილი მასალის მეცნიერული განსოგადების პირველ ცდას. ძირითადი ამოსავალი დებულებების სიმარტივისა და თვალსაჩინოების გამო ეს თეორია დღესაც ფართოდ გამოიყენება წილების თერმოდინამიკურ თვისებათა მარტივი საორიენტაციო შეფასებისათვის. მოლეკულური თეორიის ბევრი დებულება, რომელიც ეხება წილების აგებულებას, პირობითია. ამის გამო, განვიხილავთ მხოლოდ საბოლოო დამოკიდებულებებს, რომელთა გამოყენებაც ფორმალური რაოდენობრივი თეორიის ფარგლებში სრულიად გამართლებულია. გამოვსახოთ რეაქციის სახით რკინის ფუძეზე არსებულ ნალღობსა და წილის ფაზებს შორის მიმდინარე რომელიმე პროცესი, მაგალითად,



მოქმედ მასათა კანონის იდეალური ვარიანტის გამოყენებით აღნიშნული რეაქციისათვის შეგვიძლია ჩაეწეროს წონასწორობის მუდმივას მნიშვნელობა

$$K_{Mn} = \frac{(MnO)}{(FeO)[Mn]} \quad (2.119)$$

მოლეკულური თეორიის სპეციფიკა გულისხმობს (2.118) გამოსახულებაში შემავალი "აქტიური" ანუ "თავისუფალი" ოქსიდების კონცენტრაციის გამოთვლას. პირველ რიგში გავეცნოთ მოლე-

კულური თეორიის ყველაზე სრულ ვარიანტს. რომელიც შეიმუშავეს შენკმა და მისმა თანამშრომლებმა. მათი თეორიის მიხედვით, წილის სტრუქტურულ ერთეულებს წარმოადგენს ოქსიდური მოლეკულები (CaO , FeO , SiO_2 და სხვ.) და მათი ნაერთები. ამ ნაერთების სიმრავლიდან განიხილავენ მხოლოდ ხუთი შედგენილობის ნაერთს: $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$; $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$; $(\text{MnO})_2 \cdot \text{SiO}_2$; $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ და $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$. სტრუქტურული ერთეულების ეს მინიმალური რაოდენობა საკმარისია წილის იმ ძირითადი თვისებების გადმოსაცემად, რომლებიც განსაზღვრავენ ელემენტების განაწილებას წიდა-ლითონის სისტემაში.

წიდასა და ლითონს შორის სხვადასხვა ელემენტების განაწილების სამეცნიერო ლიტერატურაში არსებული ცდისეული მონაცემების დამუშავებისა და განზოგადების საყუქველზე შექმნილი იპოვება განაწილებისა და დისოციაციის მიქლიმეების რიცხვითი მნიშვნელობები. რომლებიც კარგად ეთანხმებიან ექსპერიმენტულ მონაცემებს. ქვემოთ მოყვანილია 1873 K-ზე შენკის მიერ გამოთვლილი კონსტანტების მნიშვნელობები:

$$\lg D_{(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2} = \lg \frac{(\text{FeO})^2 \cdot (\text{SiO}_2)}{((\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2)} = 1,77 \quad (2.120)$$

$$\lg D_{(\text{MnO})_2 \cdot \text{SiO}_2} = \lg \frac{(\text{MnO})^2 \cdot (\text{SiO}_2)}{((\text{MnO})_2 \cdot \text{SiO}_2)} = 0,70 \quad (2.121)$$

$$\lg D_{\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2} = \lg \frac{(\text{CaO}) \cdot (\text{SiO}_2)}{(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)} = 0,91 \quad (2.122)$$

$$L_{\text{FeO}} = [\text{FeO}] : (\text{FeO}) = 0,0149 \quad (2.123)$$

$$\lg K_{\text{Mn}} = \lg \frac{[\text{Mn}] \cdot (\text{FeO})}{(\text{MnO})} = -0,299 \quad (2.124)$$

$$\lg K_{\text{Si}} = \lg \frac{[\text{Si}] \cdot (\text{FeO})^2}{(\text{SiO}_2)} = -1,43 \quad (2.125)$$

$$\lg K_{\text{P}} = \lg \frac{[\Sigma\text{P}] \cdot (\text{FeO})^5 \cdot (\text{CaO})^4}{\Sigma\text{P}_2\text{O}_5} + 0,060(\Sigma\text{P}_2\text{O}_5) = 7,42 \quad (2.126)$$

ჩვეულებრივ თელიან, რომ კალციუმის ფერიტი განიცდის სრულ დისოციაციას, ხოლო ფოსფატი საერთოდ არ დისოცირებს. თუ გვეცოდინება მუდმივას მნიშვნელობები, მაშინ დასაშვები სიზუსტით შეგვიძლია ვიპოვოთ ელემენტების განაწილება იმ

პირობებისათვის. რომლებისთვისაც ესაზღვრავთ მათ მნიშვნელობებს. მაგრამ, უნდა აღინიშნოს, რომ ამ სქემით ანგარიშების შესრულება დაკავშირებულია დიდ სირთულეებთან და მოითხოვს შრომატევადი სამუშაოს შესრულებას. წიდაში შემავალი ოქსიდების "თავისუფალი" კონცენტრაციის განსაზღვრისათვის აუცილებელია დიდი რაოდენობის განტოლებათა ეროობლივი ამოხსნა, ვინაიდან ყველა ოქსიდისა და მათი ნაერთის კონცენტრაციები ურთიერთდაკავშირებულია. როცა წიდებას ვუმატებთ ფუძე ოქსიდებს, ეს უკანასკნელი ქიმიური ბმით უკავშირდება მუავე ოქსიდებს (SiO_2 , P_2O_5 , და სხვ.) და ამით ხელს უწყობს შესაბამისი ელემენტების ლითონიდან წიდაში გადასვლას. ელემენტები, რომლებიც წარმოქმნას ფუძე ჟანგეულებს (MnO , CrO და სხვ.), უფრო სრულად გადადის ლითონში.

ზოგიერთი მკვლევრის მიერ შემოთავაზებული იყო ზემოთ დასახელებული მეთოდის სხვადასხვა ვარიანტი. ეს ვარიანტები გულისხმობს განსხვავებულ დაშვებებს წიდას შესაძლებელი მოლეკულური შედგენილობისათვის. მაგალითად, ნ. ჩუიკოს თეორიის მიხედვით, ნაერთების ოქსიდებად დისოციაციის გარდა, სავარაუდოა მათი ნაწილობრივი დისოციაცია იონებად, ხოლო პ. გერასიმენკო თვლის, რომ წიდაში მყოფი ყველა ნაერთი დისოცირებს მხოლოდ მარტივ და რთულ იონებად. ამ დაშვებებიდან გამომდინარე, ნაერთებისა და მათი დისოციაციის პარამეტრების შერჩევით, მკვლევარს საშუალება ეძლევა გარკვეული მიახლოებით აღწეროს მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები წიდას აკუმულაციის სხვადასხვა მოდელისათვის.

წიდას მოლეკულური შედგენილობის განსაზღვრის დამოუკიდებელი მეთოდების უქონლობის გამო, ძნელია უპირატესობა მიენიჭოს რომელიმე ზემოთ დასახელებულ ვარიანტს. ამის გამო, ვერც ერთმა თეორიამ, რომელიც გულისხმობს მოლეკულური შედგენილობის შერჩევას და მის შემდგომ გამოყენებას იდეალურ მოქმედ მასათა კანონში, ვერ პოვა ფართო აღიარება. დღესდღეობით, წიდასა და ლითონს შორის არსებული წონასწორული პირობების სწორი წარმოდგენისათვის, ყველაზე მეტად გამართლებულია წიდაში არსებული ოქსიდების „თავისუფალი“ კონცენტრაციების შეცვლა მათი აქტიურობებით. მაშინ (2.119) ტოლობა

$$\text{შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით: } K_{Mn} = \frac{a_{(MnO)}}{a_{(Mn)} a_{(FeO)}}.$$

დღეისათვის დაგროვილია დიდი მოცულობის ექსპერიმენტული და თეორიული მასალა უმთავრესი წიდაური სისტემის კომ-

პონენტთა აქტიურობების შესახებ. ამ მონაცემების ყველაზე სრული ნუსხა მოთავსებულია ცნობარში [5]. 24 სურათზე წარმოდგენილია წიდაში გახსნილი FeO-ს აქტიურობები 1600 °C ტემპერატურისათვის. მაგალითი. გამოთვალეთ ჟანგბადის კონცენტრაცია (რკინაში), რომელიც 1600 °C-ზე წონასწორობაშია წიდასთან: 39,94 % CaO; 15,38 % SiO₂; 10,59 % FeO; 1,77 % Fe₂O₃; 5,23 % MgO; 10,60 % MnO; 16,09 % P₂O₅; 0,06 % S (კონცენტრაცია გამოსახულია მასურ პროცენტებში). ვისარგებლოთ [21] ნაშრომში მოყვანილი მუდმივას განტოლებით:

$$K_O = a_{(FeO)}/[\%O]; \lg K_O = \frac{6320}{T} - 2,734; \therefore K_{O(1873)} = 4,367. \quad (2.127)$$

$a_{(FeO)}$ -ს გამოთვლისათვის აუცილებელია წიდას შედგენილობა გამოვსახოთ მოლურ პროცენტებში (%M_i). ამისათვის ჯერ ვსაზღვრავთ ცალკეული კომპონენტის მოლების რაოდენობას (M_i) 100 გ წიდაში, მაგ. $M_{CaO} = \%CaO/M_{CaO} = 39,94/56 = 0,713$, ვაჯამებთ ამ სიდიდეებს $\Sigma m_i = 1,531$, ვიანგარიშებთ მოლურ პროცენტებს $\%M_i = 100(m_i/\Sigma m_i)$ ფორმულით, მაგალითად,

$$\%M_{CaO} = 100\% \cdot (0,713/1,531) = 46,5\%$$

და საბოლოოდ ვადგენთ წიდას მოლურ შედგენილობას (%): 46,5 CaO; 16,7 SiO₂; 11,0 FeO; 8,5 MgO; 7,4 P₂O₅; 9,7 MnO.

ამის შემდეგ ცალ-ცალკე ვაჯამებთ ფუძე და მჟავა ჟანგეულების კონცენტრაციებს დიაგრამის კოორდინატების შესატყვისად: $\%M_{CaO} + \%M_{MgO} + \%M_{MnO} = 64,7\%$; $\%M_{CaO} + \%M_{MgO} = 55,0\%$;

$\%M_{SiO_2} + \%M_{P_2O_5} = 24,1\%$. დიაგრამისა და მიღებული მონაცემების მიხედვით ეპოულობთ FeO-ს აქტიურობას $a_{FeO} = 0,5$; ხოლო (2.127) განტოლებიდან ვსაზღვრავთ თხევად რკინაში გახსნილი ჟანგბადის კონცენტრაციას $[O]_{(2.127)} = 0,50/4,367 = 0,11421\%$. ლიტერატურაში მოპყავთ იგივე სიდიდის ექსპერიმენტული მნიშვნელობა $[O]_{ეს} = 0,082$ მას. %. ამრიგად, გაანგარიშებით მიღებული მონაცემის სიდიდის გადახრა ექსპერიმენტულიდან არ აღემატება 25 %-ს. რაც მიუთითებს ჩატარებული გამოთვლების დამაკმაყოფილებელ სიზუსტეზე.

2.2.3. სრულყოფილი იონური ხსნარების თეორია

წილების თვისებების რაოდენობრივი თეორიის განვითარების მომდევნო ეტაპი იყო მოლეკულურიდან უფრო სრულყოფილ იონურ

მოდელზე გადასვლა. წილების თერმოდინამიკური თვისებების სტატისტიკური გამოთვლებისათვის იონური მოდელის გამოყენების პირველი ცდა ეკუთვნის მ. ტომპკინს. იონური ხსნარის ენტროპიის სტატისტიკური გამოთვლებისას მან დაუშვა, რომ ხსნარი მთლიანად დისოცირებულია იონებად. ერთი ნიშნის იონები ენერგეტიკულად ეკვივალენტურია და სითბური მოძრაობის პროცესში მხოლოდ ერთი ნიშნის იონებს შორისაა დასაშვები გადაადგილებები.

კონფიგურაციული (გადაადგილებების) ენტროპიის გამოთვლა წარმოებს $\Delta S = R \ln W$ ფორმულით. ტომპკინის თეორიის მიხედვით, ალბათობის W სიდიდე (ხსნარის ნაწილაკების განლაგების ვარიანტების სრული რიცხვი, რომელიც განსაზღვრულია ამ ნაწილაკების ურთიერთგადაადგილების რაოდენობით), ანიონებისა და კათიონების შესაბამის სიდიდეთა ნამრავლის ტოლია: $W = W_+ \cdot W_-$. ამავე დროს, წიდაში გახსნილი რომელიმე კომპონენტის ქიმიური პოტენციალი, დაეუშვათ კალციუმის სულფიდის μ_{CaS} , გამოისახება შემდეგი ტოლობით:

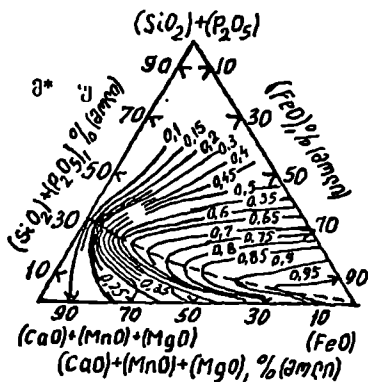
$$\mu_{CaS} = \mu_{CaS}^0 + \Delta H_{CaS} - T\Delta S_{CaS} \quad (2.128)$$

$$-T\Delta S_{CaS} = RT \ln(X_{Ca} \cdot X_S),$$

სადაც, $X_S = n_S / \Sigma n_i$; $X_{Ca} = n_{Ca} / \Sigma n_i$; n_{Ca} , n_S - კალციუმისა და გოგირდის იონების რიცხვი წილის ნაწილაკებში; Σn_i და Σn_j - ანიონებისა და კათიონების საერთო რიცხვი. თუ დაეუშვებთ, რომ $\Delta H_i = 0$, მივიღებთ $\mu_{CaS} = \mu_{CaS}^0 + RT \ln(X_{Ca} \cdot X_S)$, საიდანაც ვპოულობთ საბოლოო გამოსახულებას აქტიურობისათვის

$$a_{CaS} = X_{Ca} \cdot X_S \quad (2.129)$$

ლიტერატურიდან [23] ცნობილია, რომ სრულყოფილი იონური ხსნარების თეორიის გამოყენება სავსებით გამართლებულია ლითონსა და მაღალი ფუძიანობის წიდას შორის გოგირდის განაწილების ანგარიშისათვის. მაგრამ სილიციუმის, ფოსფორისა



სურ. 24. რკინის ოქსიდის აქტიურობა წიდაში (მრედეტთან მოთაქსებელი ციფრებით აღნიშნულია FeO-ს აქტიურობები გამოსახული მოლურ წილებში)

და ალუმინის ოქსიდების შედარებით მცირე დანამატებიც კი იწვევს ექსპერიმენტული და თეორიული მონაცემების მნიშვნელოვან აცდენას. საერთოდ, წონასწორობის პრაქტიკულ ანგარიშებში იშვიათად თუ იყენებენ სრულყოფილი იონური ხსნარების თეორიას. მიუხედავად ამისა, მისი როლი წილების თეორიის განვითარებაში ძალზე დიდია. ასე მაგალითად, ენტროპიის გამოთვლის ტიომკინისეული მეთოდი წარმატებით გამოიყენება სხვა უფრო სრულყოფილ სტატისტიკურ თეორიებში, კერძოდ, რეგულარული იონური ხსნარების თეორიაში, რომელიც ჩამოაყალიბა და დაამუშავა ვ. კოეუროვმა.

2.2.4. რეგულარული იონური ხსნარების თეორია

ხსნარების ჩვეულებრივი თეორიისაგან განსხვავებით, რეგულარულ იონურ ხსნარში ენტროპია განსხვავდება იდეალურისაგან და იგი იანგარიშება ტიომკინის ზემოთ აღწერილი მეთოდით. გარდა ამისა, ეს თეორია წიდას განიხილაეს, როგორც უმარტივესი ატომური იონების სისტემას. ამ პოსტულატებს მიუყვართ მნიშვნელოვან შედეგამდე, რომლის მიხედვითაც გასანაწილებელი ელემენტის კონცენტრაციები (ან აქტიურობები) წონასწორობის მუდმივაში წარმოდგენილია ერთი და იგივე ხარისხით, რაც წიდა-ლითონის სისტემის წონასწოვრული მდგომარეობის უფრო რეალურ სურათს იძლევა.

რეგულარული იონური ხსნარების თეორიის ყველაზე მარტივ გამოსახულებებს ვლუბულობთ მაშინ, როცა ხსნარი წარმოდგენილია საერთო იონით, მაგალითად, სუფთა ოქსიდური წიდები. ამ წიდებში ერთადერთ ანიონს წარმოადგენს ჟანგბადის იონი O^{2-} , რის გამოც ანიონური ქვესისტემის კონფიგურაციული ენტროპია ნულის ტოლია. ამასთანავე, ამ თეორიის საფუძველზე გამოყვანილ საბოლოო ფორმულებსა და რეგულარული ხსნარის თეორიის ფორმულებს შორის განსხვავება მხოლოდ იმაშია, რომ ატომურ წილებში გამოსახული კონცენტრაცია შეცვლილია კათიონურ წილებში გამოსახული კონცენტრაციით (X_i). მაგალითად, $FeO-MnO$ ბინარულ ნაღლობში FeO -ს ქიმიური პოტენციალი განისაზღვრება შემდეგი განტოლებით

$$\mu_{FeO} = \mu_{FeO}^0 + RT \ln X_{Fe} + X_{Mn}^2 \cdot Q_{Mn-Fe} \quad (2.130)$$

სადაც $X_{Fe} = n_{Fe} / (n_{Fe} + n_{Mn})$; $X_{Mn} = n_{Mn} / (n_{Fe} + n_{Mn})$ კათიონური წილებია ტიომკინის მიხედვით, ხოლო Q_{Mn-Fe} შერევის ენერჯიაა.

თუ შევადარებთ (2.130)-სა და თერმოდინამიკური აქტიურობის განტოლებას

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i = \mu_i^0 + RT \ln X_i \cdot \gamma_i, \quad (2.131)$$

FeO-ს აქტიურობის კოეფიციენტისათვის მივიღებთ შემდეგ გამოხატულებას

$$RT \ln \gamma_{(Fe)} = X_{Mn}^2 \cdot Q_{Mn-Fe}^2. \quad (2.132)$$

კოეფიციენტი მოცემული თეორია განაზოგადა ნებისმიერი შედგენილობის წილისათვის

$$RT \ln \gamma_{(Fe)} = \sum_{i=1}^{l-1} X_i \cdot Q_{if} + \sum_{i=l+1}^K X_i \cdot Q_{fi} - \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K X_i \cdot X_j \cdot Q_{ij}. \quad (2.133)$$

შერევის ენერჯიის Q_{ij} მნიშვნელობებს, რომლებიც აუცილებელია აქტიურობების განსაზღვრისათვის, პოულობენ შებრუნებული ანგარიშით არსებული ცდისეული მონაცემების მიხედვით. [38] ნაშრომის ავტორთა მონაცემების საფუძველზე, FeO, MnO, CaO, MgO, SiO₂, P₂O₅, შედგენილობის წილებისათვის კოეფიციენტის მიერ რეკომენდებულია შერევის ენერჯიის შემდეგი მნიშვნელობები: $Q_{MnO-SiO_2} = -42$ კჯ; $Q_{CaO-SiO_2} = -113$ კჯ; $Q_{CaO-P_2O_5} = -201$ კჯ; დანარჩენი $Q_{ij} = 0$. ლიტერატურული მონაცემების [38] გამოყენებით მიღებულია წონასწორობის მუდმივას შემდეგი მნიშვნელობები:

$$K_{Mn} = \frac{X_{Mn}}{[Mn]X_{Fe}} \cdot \frac{\gamma_{(Mn)}}{\gamma_{(Fe)}}; \lg K_{Mn} = \frac{6700}{T} - 3.12,$$

$$K_P = \frac{X_P^2}{[P]^2 X_{Fe}^5} \cdot \frac{\gamma_{(P)}^2}{\gamma_{(Fe)}}; K_P = 2,29 \cdot 10^{-2}.$$

$$K_O = \frac{a_{Fe}}{[O]} = X_{Fe} \frac{\gamma_{(Fe)}}{[O]}; \lg K_O = \frac{6320}{T} - 2.734. \quad (2.134)$$

(K_P -ს ცვლილება უმნიშვნელოა ტემპერატურისგან დამოკიდებულებით).

თუ (2.133) განტოლებაში შევიტანთ Q_{ij} -ს ზემოთ მოყვანილ მნიშვნელობებს, მაშინ აქტიურობის კოეფიციენტებისათვის მივიღებთ:

$$\lg \gamma_{(Fe)} = \frac{4000}{T} [2,18 \cdot X_{Mn} \cdot X_{Si} + 5,90(X_{Ca} + X_{Mg})X_{Si} + 10,50X_{Ca} \cdot X_P], \quad (2.135)$$

$$\lg \gamma_{(Mn)} = \lg \gamma_{(Fe)} - \frac{2180}{T} X_{Si} \quad (2.136)$$

$$\lg \gamma_{(P)} = \lg \gamma_{(Fe)} - \frac{10500}{T} X_{Ca} \quad (2.137)$$

აქ მოყვანილი განტოლებების საშუალებით შეგვიძლია გამოვთვალოთ ჟანგბადის, მანგანუმის და ფოსფორის კონცენტრაცია ლითონში, რომელიც წონასწორობაშია ზემოთ დასახელებული შედგენილობის წიდასთან.

მაგალითი. განესაზღვროთ ჟანგბადის, მანგანუმის და ფოსფორის კონცენტრაცია ლითონში წინა მაგალითში მოყვანილი საწყისი მონაცემების მიხედვით. წილის (100 გ) შედგენილობა მოცემულია:

ოქსიდი	FeO	MnO	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SiO ₂
მოლელების რიცხვი 100 გ წიდაზე	0,147	0,149	0,713	0,131	0,113	0,256

ვანგარიშობთ კათიონების მოლელების საერთო რაოდენობას 100 გ წიდაში* $\sum_{i=1}^6 V_{ii} = 0,147 + 0,149 + 0,713 + 0,131 + 2 \cdot 0,113 + 0,256 = 1,622$ და ვსაზღვრავთ კათიონების იონურ წილებს, მაგალითად $X_{Fe} = 0,147/1,622 = 0,091$.

კათიონი	Fe	Mn	Ca	Mg	P	Si
X _i	0,091	0,092	0,440	0,081	0,139	0,158

ამის შემდეგ ვანგარიშობთ FeO, MnO, P₂O₅-ს აქტიურობის კოეფიციენტებს. FeO-ს აქტიურობის კოეფიციენტს 1600 °C-ზე ვპოულობთ (2.135) განტოლების მიხედვით: $\lg \gamma_{(Fe)} = 1,17 \cdot 0,092 - 0,158 + 3,15 \cdot (0,44 + 0,081) - 0,158 + 5,60 \cdot 0,440 - 0,139 = 0,618$; $\gamma_{(Fe)} = 4,150$. MnO-ს აქტიურობის კოეფიციენტს - (2.136) ფორმულით: $\gamma_{(Mn)} = 2,710$; P₂O₅-ის აქტიურობის კოეფიციენტს - (2.137) განტოლებით $\lg \gamma_{(P)} = 0,618 - 5,600 \cdot 440 = -1,846$; $\gamma_{(P)} = 0,014$.

X_i და γ_i მნიშვნელობები შეგვაქვს (2.134) განტოლებებში და ამოვხსნით მათ [Mn], [P] და [O]-ს მიმართ:

$$[Mn] = \frac{0,092 \cdot 2,710}{2,865 \cdot 0,091 \cdot 4,150} = 0,230\%, (0,212\%);$$

* v_i ლითონის ატომების რიცხვია ოქსიდის „მოლეკულაში“.

$$[P] = \frac{0,139 \cdot 0,014}{(2,29 \cdot 10^{-2})^{1/2} \cdot 0,091^{5/2} \cdot 4,150^{5/2}} = 0,147 \% , (0,111 \%);$$

$$[O] = \frac{0,091 \cdot 4,150}{4,47} = 0,084 \% . (0,082 \%).$$

ფრჩხილებში მოყვანილია ცდისეული მონაცემები.

შენკის მეთოდის მსგავსად, რეგულარული იონური ხსნარების თეორია ემყარება ინტერპოლაციურ ფორმულებს. გაანგარიშება ხორციელდება კოეფიციენტების (შერევის ენერგია) გამოყენებით, რომელიც განისაზღვრება სისტემის წონასწორობის კვლევის შედეგად მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე. უნდა აღინიშნოს, რომ იონური ხსნარების თეორიით რეკომენდებული ფუნქციონალური დამოკიდებულებები კონცენტრაციასა და თერმოდინამიკურ მახასიათებლებს შორის უფრო დამაჯერებლად და დასაბუთებული, ვიდრე სხვა თეორიების (მოლეკულური და სრულყოფილი იონური ხსნარების) გამოყენებით მიღებული შედეგები.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, დიდი პერსპექტივა აქვს ბოლო ათწლეულში შემოთავაზებულ თეორიას, რომელიც წიდას განიხილავს, როგორც კოლექტიური ელექტრონული სისტემის მქონე ფაზას. ამ თეორიის დაწვრილებითი აღწერა და გამოყენება მოყვანილია [7,24] შრომებში.

თ ა ვ ი III

ელემენტების თერმოდინამიკა რკინის ნალღობში

2.3.1. ნახშირბადის ხსნადობა

ფოლადსადნობ ტემპერატურაზე თხევად რკინაში ნახშირბადის ხსნადობის ტემპერატურული დამოკიდებულება გამოისახება შემდეგი ტოლობით

$$[\%C] = 1,34 + 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot t \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.138)$$

განუზავებელ ხსნარებში ნახშირბადის ხსნადობის კვლევის ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული ექსპერიმენტული მეთოდი ემყარება CO-CO₂ აირადი ნარევისა და რკინის ნალღობის წონასწორობის კვლევას. ამ დროს ნახშირბადის აქტიურობას $a_c = f_c[\%C]$ (სტანდარტულ მდგომარეობად ნაყარაულებია ნახშირბადის 1%-

იანი იდეალური განზავებული ხსნარი თხევად რკინაში) საზღვრავენ ქვემოთ მოყვანილი რეაქციის წონასწორობის მუდმივას გამოსახულებიდან

$$[C] + CO_{(g)} = 2CO_{(g)}; K = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2} \cdot a_c} \quad (2.139)$$

როცა ცნობილია P_{CO}^2 / P_{CO_2} ფარდობის ექსპერიმენტული მონაცემები. ასეთი ხერხით ნაპოვნი I_c -ს კონცენტრაციული დამოკიდებულებებიდან განისაზღვრება რკინის ნაღვლობისათვის ურთიერთქმედების პარამეტრების მნიშვნელობები (იხ. ცხრ. 2.3). ნახშირბადის აქტიურობის შესწავლამ ცხადყო, რომ მისი კონცენტრაციის ზრდას თან სდევს აქტიურობის კოეფიციენტის ზრდაც.

ცნობარში მოყვანილია 1% ნახშირბადის შემცველობის რკინის ნაღვლობაში სუფთა გრაფიტის გადასვლის ΔG° -ის ტემპერატურული დამოკიდებულების განტოლება

$$[C]_{გრ} = [C]_{(1\% რკინაში)} \quad \Delta \bar{G}_c^\circ = 22600 - 42.3 \cdot T. \quad \text{ჯ.} \quad (2.140)$$

ამ განტოლების პირველი წევრი წარმოადგენს რკინაში გრაფიტის გახსნის სითბოს (ΔH_c°), როცა წარმოიქმნება ნახშირბადის უსასრულოდ განზავებული ხსნარი.

ლიტერატურული [5, 7] მონაცემების მიხედვით 1873 K-ზე, როცა სტანდარტულ მდგომარეობად მიღებულია სუფთა გრაფიტი, ნახშირბადის აქტიურობის კოეფიციენტი უსასრულო განზავებისას γ_c° (Fe-ში) ტოლია 0,57-ის. ამ სიდიდის შესაბამის I_c -ს მნიშვნელობაზე გამრავლებით შესაძლებელია ვიპოვოთ γ_c სიდიდე ნახშირბადის ნებისმიერი კონცენტრაციისათვის.

2.3.2. ნახშირბადის და ჟანგბადის ურთიერთქმედება რკინის ნაღვლობაში

ჟანგბადის ნახშირბადთან ურთიერთქმედება ფოლადის წარმოების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი პროცესია. ამ ურთიერთქმედების შედეგად წარმოიქმნება აირადი პროდუქტი, რომელიც გამოიყოფა თხევადი ფოლადიდან (ფოლადის „დუღილი“). ფოლადში გახსნილ ნახშირბადსა და ჟანგბადს შორის მიმდინარე რეაქცია გამოისახება შემდეგი განტოლებით

$$[O]_{(1\%)} + [C]_{(1\%)} = CO_{(g)} \quad (2.141)$$

ამ რეაქციის თერმოდინამიკური მახასიათებლები შესაძლებელია მივიღოთ რკინის ნაღობში ჟანგბადისა და ნახშირბადის ხსნადობის მონაცემების განტოლებათა კომბინირებით

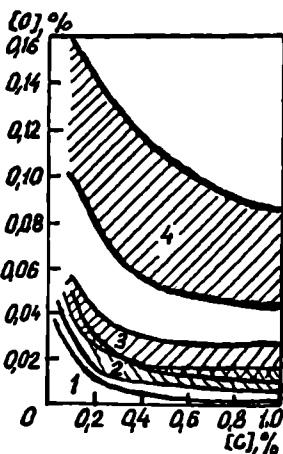
$$C_{3g} + \frac{1}{2}O_{2(a)} = CO_{(a)}; \Delta G^\circ = -118000 - 84,4 \cdot T, \text{ჯ} [5]. \quad (2.142)$$

ექსპერიმენტულ მონაცემებს კარგად აღწერს (2.141) რეაქციის ΔG° და $\lg K$ -ს ტემპერატურული დამოკიდებულებების შემდეგი განტოლებები [5]:

$$\Delta G^\circ = -22400 - 39,97 \cdot T, \text{ჯ}, \quad (2.143)$$

$$\lg K = \lg \frac{P_{CO}}{f_C[C] \cdot f_o[O]} = \frac{1168}{T} + 2,07 \quad (2.144)$$

ამ განტოლებებიდან ჩანს, რომ რკინაში გახსნილი ჟანგბადის საშუალებით ნახშირბადის დაჟანგვის რეაქცია მიმდინარეობს სითბოს გამოყოფით. ხოლო (2.144) განტოლება მიუთითებს, რომ T და P_{CO} -ს მუდმივობისას $a \cdot a_o$ ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა. ვინაიდან ნაღობში ნახშირბადისა და ჟანგბადის მცირე შემცველობისას $f_C \cdot f_o$ ნამრავლი ერთთან მიახლოებული სიდიდეა, ამ ელემენტების წონასწორულ კონცენტრაციათა ნამრავლიც $[C][O]=m$ შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივ სიდიდედ. ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით, 1873 K-ზე $m=0,0025$ მას. %. გრაფიკულად ეს დამოკიდებულება გამოსახულია სურათზე 2.5 (1 მრუდი). ნახშირბადისა და ჟანგბადის უფრო მაღალი კონცენტრაციებისათვის, რომლებიც არაა მითითებული გრაფიკზე, მ არ შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივ სიდიდედ. ამ შემთხვევაში მხედველობაში ვიღებთ f_C და f_o მნიშვნელობებს, რომელთა გამოთვლაც შეგვიძლია ურთიერთქმედების პარამეტრთა საშუალებით. ფოლადსადნობ აგრეგატებში $[CH_2O]$ ნამრავლის ჰქმმარიტი მნიშვნელობა საგრძნობლად აღემატება თეო-



სურ. 2.5 რკინაში ჟანგბადის კონცენტრაციის დამოკიდებულება ნახშირბადის შემცველობისაგან: 1. წონასწორული მრუდი, რომელიც შეესაბამება (2.144) განტოლებას; 2. ფაქტობრივი კონცენტრაციები 40- და 100-ტონიანი ელექტრორკალური ღუმელებისათვის; 3. ფაქტობრივი კონცენტრაციები მარტენის ღუმელებისათვის; 4. წონასწორული კონცენტრაციები მარტენის წიღებისათვის

რიულს (სურ. 2.5 2...4 მრუდები). ეს აიხსნება იმით, რომ ღუმელში ადგილი აქვს ჟანგბადის გადასვლას წიდიდან თხევად ლითონში.

თერმოდინამიკის კანონებიდან გამომდინარე, P_{CO} -ს შემცირებისას უნდა კლებულობდეს $m=[C][O]$ მნიშვნელობაც, რაც განაპირობებს ღრმად განჯანგული ლითონის მიღებას. პრაქტიკაში სწორედ ეს მოვლენაა გამოყენებული ვაკუუმურ პროცესებში და თხევადი ლითონის ნეიტრალური აირით დამუშავებისას.

2.3.3. გოგირდი ნალღობებში

ფოლადში გოგირდის მაღალი შემცველობა საგრძნობლად აუარესებს მის მექანიკურ თვისებებს (პლასტიკურობა, სიბლანტე და სხვ.). გოგირდი ფოლადში უმთავრესად ხედება თუჯიდან. ხოლო თვით თუჯში – გადასამუშავებელი მადნიდან, კოქსიდან და ამწიდელებიდან. მართალია, მცირე და საშუალო ტევადობის ელექტრორკალური ღუმელების კაზმში თუჯს არ იყენებენ, მაგრამ გადასადნობი ჯართი ყოველთვის შეიცავს დასამუშავებზე მეტ გოგირდს. ამიტომ, ელექტროფოლადის გამოდნობის თითქმის ყველა ტექნოლოგიურ პროცესში ნაგულისხმებია ლითონში გოგირდის შემცირების სხვადასხვა საშუალება.

თხევად რკინაში იხსნება გოგირდის განესაზღვრელი, ხოლო მყარში – მცირე ($\leq 0,05\%$) რაოდენობა. ამიტომ, გამყარების პროცესში, თუკი თხევად ლითონში გახსნილია გოგირდის ჭარბი რაოდენობა ($> 0,05\%$). ადგილი აქვს გოგირდის გამოყოფას FeS -ის ან $FeS \cdot FeO$ -ს ნაერთების სახით. რკინის სულფიდი (FeS) რკინასთან (Fe) წარმოქმნის ევტექტიკას დნობის ტემპერატურით $988\text{ }^{\circ}C$. ფოლადის (რკინის) გამყარების ბოლოსათვის ეს ევტექტიკა იკავებს ადგილს ლითონის ჩამოყალიბებული მარცვლების ირგვლივ და ამით ამცირებს კაეშირს მათ შორის. ევტექტიკური ჩანართების უარყოფითი გავლენა თავს იჩენს ლითონის ცხლად დამუშავებისას (გლინვა, ჭედვა). დამუშავების პროცესში ისინი ხელს უწყობენ ფოლადში ბზარების და ნაპრალების წარმოქმნას, რაც, თავის მხრივ, უვარგისს ხდის გამოდნობილ პროდუქტს. იმისათვის, რომ გამოირიცხოს თხევადი ევტექტიკის წარმოქმნა, გამოდნობილ ფოლადში გოგირდის კონცენტრაცია არ უნდა აღემატებოდეს მის მაქსიმალურ სხნადობას $0,05\%$ -ს მყარ რკინაში.

გოგირდის გავლენა ფოლადის ხარისხზე არ განისაზღვრება მარტო მისი შემცველობით. დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე ფოლადში მისი არსებობის ფორმებსაც. იმისათვის, რომ განვა-

ხორციელოთ ფოლადის განვითარების პროცესი, საჭიროა ეცოდეთ ფოლადში გახსნილი გოგირდის თერმოდინამიკა, მისი ურთიერთქმედება სხვადასხვა ელემენტებთან ან ნაერთებთან და გოგირდოვანი ნაერთების წიდაში, ან აირად ფაზაში გადასვლის თერმოდინამიკური პირობები.

კალორიმეტრული მეთოდით [31] განსაზღვრულია თხევად რკინაში გოგირდის გახსნის სითბო ($\Delta H = -72$ კჯ) ქვემოთ მოყვანილი რეაქციის მიხედვით



ამ მონაცემისა [7] და ლიტერატურაში [5, 32] არსებული მასალის (ზემოთ მოყვანილი რეაქციის ΔG -ს მნიშვნელობა, რომელიც განსაზღვრულია წონასწორობის მეთოდით 1873 K-ზე) საფუძველზე შედგენილია (2.145) რეაქციის ΔG_s° -ის ტემპერატურისაგან დამოკიდებულების განტოლება

$$\Delta G_s^\circ = -72000 - 9,92 \cdot T, \text{ ჯ; } \lg \frac{f[\%S]}{\sqrt{P_s}} = \frac{3760}{T} + 0.518. \quad (2.146)$$

რკინაში გახსნილი გოგირდის აქტიურობის კოეფიციენტზე სხვადასხვა ელემენტის გავლენა განისაზღვრება ურთიერთქმედების პარამეტრებით (იხ. 2.4 და 2.5 ცხრილი). ამ ცხრილებში მოყვანილი მონაცემების მიხედვით, ნახშირბადი, ფოსფორი და სილიციუმი საგრძნობლად ზრდის გოგირდის აქტიურობის კოეფიციენტის სიდიდეს. სწორედ ამის გამო, გოგირდის აქტიურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა თუჯში გაცილებით მეტია, ვიდრე რკინაში.

2.3.4. გოგირდის ურთიერთქმედება წიდასთან

წიდას მიერ გოგირდის შთანთქმის უნარი დიდადაა დამოკიდებული დამუხანგავ პოტენციალზე. თხევად წიდაში გოგირდის საგრძნობი ხსნადობა შეიძინევა ორ შემთხვევაში: როცა ჟანგბადის წონასწორობის წნევა ნაკლებია 10^6 ატმ-ზე ან მეტია 10^4 ატმ-ზე. ეს შეესაბამება ორ სხვადასხვა ვალენტობას, რომელსაც გოგირდი ავლენს წიდაში: -2 (სულფიდური) და -6 (სულფატური). იონური მოდელის გამოყენებით, წიდაში გოგირდის სულფიდური და სულფატური ფორმით ხსნადობა შესაძლებელია გამოვსახოთ შემდეგი ორი რეაქციით:

$$\frac{1}{2}S_{2(g)} + (O^{2-}) = \frac{1}{2}O_{2(g)} + (S^{2-}): K_I = \left(\frac{a_{S^{2-}}}{a_{O^{2-}}}\right) \left(\frac{P_{O_2}}{P_{S_2}}\right)^{1/2} \quad (2.147)$$

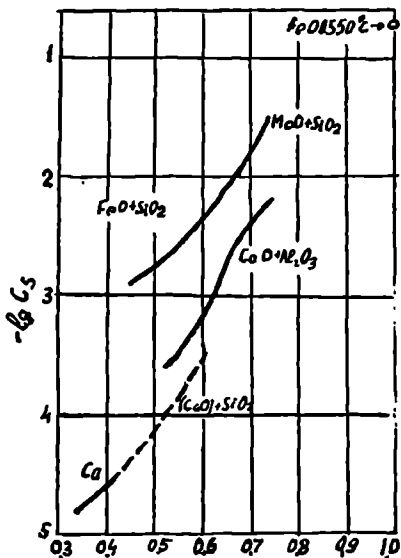
$$\frac{1}{2}S_{2(g)} + \frac{3}{2}(O^{2-}) = (SO_4^{2-}): K_{II} = \frac{a_{SO_4^{2-}}}{a_{O^{2-}}^3} \cdot \frac{1}{P_{S_2}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{3/2}} \quad (2.148)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ მოცემული წილისათვის გოგირდის მცირე კონცენტრაციებისას მისი აქტიურობის კოეფიციენტი და $a_{O^{2-}}$ მნიშვნელობა პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული (%S)-ზე, მაშინ (2.147) და (2.148) გამოსახულებები შეიძლება გარდაქმნათ შემდეგნაირად

$$K_I' = (\%S) \left(\frac{P_{O_2}}{P_{S_2}}\right)^{1/2} \quad (2.149)$$

$$K_{II}' = (\%S) \frac{1}{P_{S_2}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{3/2}} \quad (2.150)$$

მიღებული შედეგები შესაბამისად წილის სულფიდურ და სულფატურ ტევადობებს წარმოადგენენ, როცა $P_{O_2} < 10^{-8}$ ატმ-ზე, მაშინ წილისა და ფოლადის ნაღობების ურთიერთქმედებისას სულფიდურ ტევადობას K_I' (ჩვეულებრივად აღინიშნება C_s -თი) პირველხარისხოვანი მნიშვნელობა ენიჭება. [35] ავტორებმა 1500 °C-ზე განსაზღვრეს FeO-SiO₂; MnO-SiO₂; CaO-Al₂O₃ და CaO-SiO₂ ბინარული სისტემების სულფიდური ტევადობა. C_s -ის შედგენლობისგან დამოკიდებულების გრაფიკები მოყვანილია სურათზე 2.6. როგორც ამ გრაფიკებიდან ჩანს, სულფიდური ტევადობა ფუძიანობის ზრდით მკვეთრად მატულობს, გარდა ამისა, რკინისა და მანგანუმის სილიკატების სულფიდური ტევადობა უფრო მეტია, ვიდრე კალციუმის სილიკატებისა და ალუმინატების, ე.ი. ლოგიკით, ამ უკანასკნელი ნაერთების განმაგოგირდებელი თვისებები უფრო დაბალი უნდა იყოს, ვიდრე მანგანუმისა და რკინის სილიკატების. მაგრამ აქ მხედველობაშია მისაღები შემდეგი გარემოება: კალციუმის სილიკატები და ალუმინატები მდგრადია დაბალი განმუხანგავი პოტენციალების პირობებში; მაგალითად, როცა გარემო ადმდგენელია, ისინი ინარჩუნებენ მაღალ განმაგოგირდებულ თვისებებს. მაშინ, როცა მანგანუმისა და რკინის სილიკატებს C-CO-სთან



წუძიანობის მოკლე ნიღი

სურ. 2.6. 1500 °C-ზე CaO-Al₂O₃, CaO-SiO₂, FeO-SiO₂ და MnO-SiO₂ ნაღლობის სულფიდური ტეყადობა

წონაწირობის პირობებში არსებობა შეუძლიათ მხოლოდ ძლიერ განზავებული ხსნარების სახით ე.ი. MnO-ს და FeO-ს ძალიან დაბალი აქტიურობის პირობებში.

განვიხილოთ წიდის ნაღლობებთან ლითონში გახსნილი გოგირდის ურთიერთქმედების თერმოდინამიკური პირობები. დადგინოლია, რომ ყველაზე უკეთ ლითონიდან წიდაში გოგირდის გადასვლის პროცესი ხორციელდება მაღალფუძიანი, კალციუმის ოქსიდით მდიდარი წიდეების გამოყენებით. ამასთანვე, გამოითქვა მოსაზრება, რომ აღნიშნული პროცესი გამოისახება შემდეგი რე-



ამ რეაქციის პარალელურად, ლითონსა და წიდას შორის მიმდინარეობს გოგირდისა და ჟანგბადის განაწილების პროცესები:



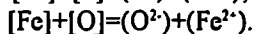
აქედან გამომდინარე, სისტემის წონასწორული მდგომარეობა შეიძლება აღიწეროს ქვემოთ მოყვანილი სამი განტოლებით:

$$K_S = \frac{a_{(\text{CaS})} \cdot a_{[\text{FeO}]}}{a_{(\text{CaO})} \cdot a_{[\text{FeS}]}} \quad (2.154)$$

$$L_S = \frac{a_{(\text{FeS})}}{a_{[\text{FeS}]}}; \quad L_O = \frac{a_{(\text{FeO})}}{a_{[\text{FeO}]}} \quad (2.155)$$

რომელთა მიხედვით ღვინდება განგოგირდების რეაქციისა და განაწილების პროცესების ურთიერთკავშირი. აქედან გამომდინარე, განმუხანგველების (C, Si და სხვ.) გამოყენება, რომლებიც ამცირებენ ლითონისა და წიდის დაჟანგვის ხარისხს, საგრძნობლად აუმჯობესებენ ლითონის განგოგირდების თერმოდინამიკურ პირობებს.

განგოგირდების მექანიზმის უფრო ნათელ სურათს იძლევა წილის იონური თეორიის გამოყენება. ამ თეორიის მიხედვით. (2.151–2.153) რეაქციები შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:



ამ შემთხვევაში:

$$a_{CaS} = a_{Ca^2+} \cdot a_{S^2-}; \quad a_{CaO} = a_{Ca^2+} \cdot a_{O^2-}$$

$$a_{FeS} = a_{Fe^2+} \cdot a_{S^2-}; \quad a_{FeO} = a_{Fe^2+} \cdot a_{O^2-}$$

ლითონურ ფაზაში FeS და FeO-ს აქტიურობებს სიმკვრივის გამო ვცვლით გოგირდის და ჟანგბადის მასურ პროცენტებში გამოსახული კონცენტრაციებით (ეუშეებთ, რომ საქმე გვაქვს განზავებულ ხსნართან, სადაც $f_{[S]} = f_{[O]} = 1$) და ვღებულობთ:

$$L_S = \frac{a_{Fe^2+} \cdot a_{S^2-}}{[\%S]} = N_{Fe^2+} \cdot N_{S^2-} \cdot \gamma_{Fe^2+} \cdot \gamma_{S^2-}, \quad (2.157)$$

$$L_O = \frac{a_{Fe^2+} \cdot a_{O^2-}}{[\%O]} = N_{Fe^2+} \cdot N_{O^2-} \cdot \gamma_{Fe^2+} \cdot \gamma_{O^2-}, \quad (2.158)$$

$$K_S = \frac{a_{S^2-} \cdot [\%O]}{a_{O^2-} \cdot [\%S]} = \frac{N_{S^2-} \cdot \gamma_{S^2-} \cdot [\%O]}{N_{O^2-} \cdot \gamma_{O^2-} \cdot [\%S]}. \quad (2.159)$$

(2.157–2.159) განტოლებებიდან გამოიძინარეობს, რომ განგოგირდებისათვის საჭიროა შემცირდეს წილაში გოგირდის ანიონების მოლური წილი (N_{S^2-}) და გაიზარდოს ჟანგბადის ანი-

ონების მოლური წილი (N_{O^2-}). წილებში ჟანგბადის ანიონების

კონცენტრაცია იზრდება ფუძე ჟანგეულების შეყვანით. მაგრამ თუ ფუძე წილაში ამავე დროს არის მუაჟა ჟანგეულებიც (SiO_2 , P_2O_5 , და სხვ.). რომლებიც წარმოქმნიან რთულ კომპლექსებს ჟანგბადის ანიონების მიერთებით, მაშინ ჟანგბადის ანიონების რაოდენობა შემცირდება და შემცირდება განგოგირდების მაჩვენებელიც. ეს ახსნა კარგად შეესაბამება პრაქტიკასაც. ცნობილია, რომ მუაჟა ჟანგეულების დამატებით განგოგირდების პროცესი უარესდება (ჭიანურდება), ხოლო მათი დიდი რაოდენობით შეყვანისას – სულ წყდება. განმაგოგირდებელი წილების ერთ-ერთი ყველაზე მთავარი დამახასიათებელი ტექნოლოგიური პარამეტრია წილისა და ლითონის ნალღობებს შორის გოგირდის წონასწორული

განაწილების კოეფიციენტი $L_s = (\%S)/[\%S]$, რომლის განსაზღვრაც შესაძლებელია თუკი ცნობილია მოცემული წიდის სულფიდური ტექნოლოგია. ამისათვის C_s სიდიდე უნდა გარდაგვექმნათ $L_{s-o} = (\%S)[\%O]/[\%S]$ კოეფიციენტად, რომელიც წარმოადგენს ზემოთ მოყვანილი რეაქციის სახეცვლილ წონასწორობის მუდმივას

$$K = a_{s_2} \cdot \frac{[\%O]}{[\%S]} \quad (2.160)$$

(a_{O_2} -ის და გოგირდის აქტიურობის კოეფიციენტების მოცემული მნიშვნელობებისათვის). L_s -ის საპონენლად უნდა ვიცოდეთ ლითონში გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობაც. როგორც ადრე აღვნიშნეთ, C_s -ის მოცემული მნიშვნელობისას განგოგირდების პროცესი მით უკეთ წარიმართება, რაც უფრო სრულადაა განჟანგული ლითონი. რეაქცია ხორციელდება 100–200 კჯ სითბოს შთანთქმით. ტემპერატურის გავლენის შესწავლით ანალოგიურ შედეგს ვიღებთ L_{s-o} -სათვის.

გამოთვალეთ 1873 K ტემპერატურაზე რკინისა და წიფურ ნაღვლებს ($CaO=53\%$; $Al_2O_3 - 47\%$) შორის გოგირდის განაწილების კოეფიციენტი. C_s და L_{s-o} მნიშვნელობათა შეპირისპირებით ეპოულობთ:

$$\lg L_{s-o} = \lg C_s + \lg \frac{[O]}{\sqrt{P_{O_2}}} - \lg \frac{[S]}{\sqrt{P_{S_2}}} \quad (2.161)$$

ლიტერატურაში მოყვანილი მონაცემების მიხედვით 1873 K ტემპერატურაზე მოცემული წიდების შედგენილობებისათვის $\lg C_s = -2,4$, ხოლო $f_{[O]} = f_{[S]} = 1$ დაშვებით ვღებულობთ $\lg L_{s-o} = -2,4 + 3,42 - 2,53 = -1,51$; $L_{s-o} = 0,03$. აქედან, L_s -ის მნიშვნელობის განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ ლითონში ჟანგბადის რაოდენობა. უკანასკნელს ეპოულობთ ლითონში გახსნილი ალუმინის მიხედვით, რისთვისაც ვიყენებთ ელემენტების განჟანგვის უნარის გრაფიკს. ექსპერიმენტული და გამოთვლებით მიღებული მონაცემები მოყვანილია 2.6 ცხრილში.

ცხრილი 2.6.

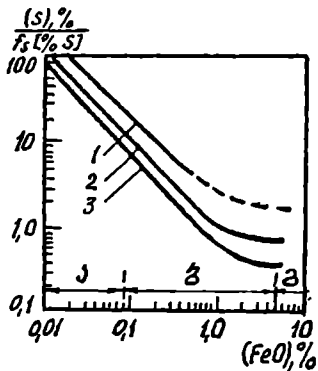
L_s -ის ექსპერიმენტული და გამოთვლილი მნიშვნელობები

[Al] %	[O] %	L_s^*	[Al] %	[O] %	L_s^*
0,02	0,00034	90/35	0,05	0,00019	160/150
0,03	0,00026	115/70	0,10	0,00012	250/500

* ამ ცხრილის L_s სვეტების მრიცხველში მოყვანილია გამოთვლილი მნიშვნელობები, მნიშვნელში - ექსპერიმენტული.

მათი შედარება გეიხვენებს, რომ გამოთვლილი მნიშვნელობები შესაძლებელია გამოვიყენოთ L_s -ის მხოლოდ საორენტაციო შეფასებისათვის.

სხვადასხვა წილებისათვის გოგირდის განაწილების ექსპერიმენტული მონაცემები წარმოდგენილია სურათზე 2.7. მასზე მოყვანილი წილების ფუძიანობის საზომად მიღებულია R - "თავისუფალი" ფუძე ჟანგულების მოლური წილი, რომლის გამოთვლაც წარმოებს შემდეგი ფორმულებით: ელექტრო და საბრძმე დნობების აღმდგენელი პირობებისათვის $R = n_{CaO} + \frac{2}{3}n_{MgO} - n_{SiO_2} - n_{Al_2O_3}$ (n_i - ოქსიდების მოლების რაოდენობა 100 გ წიდაში), დამუხანგავი რაფინირების პირობებისათვის $R = n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO} - 2n_{SiO_2} - 4n_{P_2O_5}$. 2.17 სურათზე წარმოდგენილი მონაცემების მიხედვით, წიდაში გახსნილი



სურ. 2.7 წიდაში გახსნილი რკინის ქვეყანვის გააღვანა გოგირდის განაწილების კოეფიციენტზე R-ის სხვადასხვა მნიშვნელობისას: 1-0,22; 2-0,15; 3-0,10:

ა - საბრძმე წიდები, ბ - ელექტროფოლადსადნობი პროცესების აღმდგენელი წიდები, გ - დამუხანგავი წიდები.

რკინის ქვეყანგი (კონცენტრაციულ ინტერვალში 0-1 მას %), მკვეთრად ამცირებს $L_s = \frac{(\%S)}{[\%S]}$ მნიშვნელობას. ეს მოვლენა შეიძლება აიხსნას წიდაში რკინის ანიონების Fe^{2-} რაოდენობის ზრდით, რაც, თავის მხრივ, (2.157) განტოლებიდან გამომდინარე, იწვევს ლითონიდან წიდაში გადასული გოგირდის რაოდენობის შემცირებას.

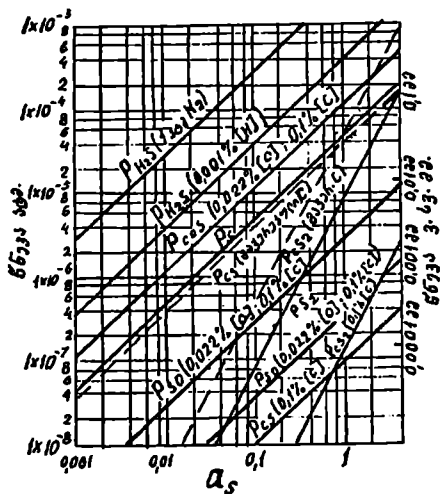
2.3.5 გოგირდის ურთიერთქმედება აირად ფაზასთან

ფოლადის დნობის პროცესში თხევად ლითონში ყოველთვისაა ელემენტები, რომლებსაც გააჩნიათ შესაძლებლობა გოგირდთან წარმოქმნან აირადი ნაერთები. ეს ელემენტებია: ნახშირბადი, ჟანგბადი, წყალბადი, სილიციუმი. გოგირდიდან მათი ურთიერთქმედებით მიიღება შემდეგი ნაერთები: CS, CS₂, COS, HS, H₂S, SO, SO₂, SiS და სხვ. ზოგიერთი ნაერთის წარმოქმნის წონასწორობის კონსტანტის ტემპერატურისაგან დამოკიდებულების კოეფიციენტების მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში 2.17.

$\lg K = \frac{A}{T} + B$ განტოლების კოეფიციენტთა მნიშვნელობები

რეაქცია	A	B
$[S] = \frac{1}{2} S_{2(s)}$	-3670	-0.518
$[S] + \frac{1}{2} H_{2(s)} = HS_{(s)}$	-7718	0.283
$[S] + [H] = HS_{(s)}$	-5812	-1.874
$[S] + H_{2(s)} = H_2S_{(s)}$	973	-3.12
$[S] + 2[H] = H_2S_{(s)}$	4786	0.066
$[S] + [C] = CS_{(s)}$	-13672	1.845
$2[S] + [C] = CS_{2(s)}$	-5714	-3.002
$2[S] + [O] = S_2O_{(s)}$	-4731	-4.510
$[S] + [O] = SO_{(s)}$	-6803	-0.426
$[S] + 2[O] = SO_{2(s)}$	2662	-4.563
$[S] + 3[O] = SO_{3(s)}$	1528	-9.450
$[S] + [Si] = SiS_{(s)}$	-12908	2.735
$2[S] + [Si] = SiS_{2(s)}$	-8113	-1.873

გოგირდის შემცველი სხვადასხვა ნივთიერებების ორთქლის წნევები თხევადი აბზანის ზედაპირზე მოყვანილია სურათზე 2.8. აბცისაზე გადაზომილია გოგირდის აქტიურობები. მოყვანილი მონაცემების მიხედვით როგორც თუჯიდან, ასევე ფოლადიდან, გოგირდის მოცილება აირადი ნაერთების სახით ნაკლებადაა მოსალოდნელი, მიუხედავად იმისა, რომ გოგირდის აქტიურობის კოეფიციენტი თუჯში 5-6 ჯერ მეტია, ვიდრე თხევად ფოლადში. მხოლოდ ძალზე დაბალი ვაკუუმის პირობებშია შესაძლებელი განგოგირდების პროცესის რეალიზაცია, მაგრამ პრაქტიკაში ასეთი ვაკუუმის მიღება ძალზე ძნელია.



სურ. 2.8 გოგირდის შემცველი ნივთიერებების ორთქლის წნევა ნაღობის ზედაპირზე 1600 °C.

2.3.6 გოგირდის ურთიერთქმედება სულფიდწარმოქმნელ ელემენტებთან

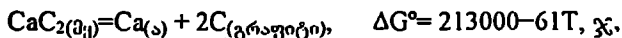
ხშირ შემთხვევაში რკინის ნაღვლებების განგოგირდებისათვის იყენებენ ზოგიერთი ლითონის (Ba, Ca, Ce, Na, K, La, Mg-და სხვ.) მაღალ ქიმიურ სწრაფვას გოგირდისადმი. თხევად ფოლადში ასეთი ელემენტების შეყვანა უზრუნველყოფს საბოლოო პროდუქტის მიღებას გოგირდის მინიმალური კონცენტრაციით. ქვემოთ მოყვანილია ზოგიერთი მტკიცე სულფიდის წარმოქმნის გიბსის ენერჯის მნიშვნელობები (კჯ/მოლი)

სულფიდი	Al ₂ S ₃	BaS	CaS	CeS	K ₂ S	La ₂ S ₃	MgS	MnS	Na ₂ S	TiS
- ΔG ₂₉₈	275	464	513	533	397	455	389	298	1400	254
- ΔG ₁₈₇₃	-	-	340	401	-	-	184	140	-	-

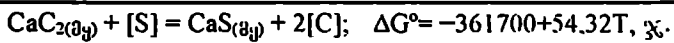
განსაკუთრებით ეფექტურია იმ ლითონების გამოყენება, რომლებიც ცუდად ან სრულებით არ იხსნებიან რკინაში (Ba, Ca, Ce, K, Na, La, Mg). ამის გამო, რაფინირების პროცესში ისინი ინარჩუნებენ მაღალ აქტიურობას, რითაც უზრუნველყოფილია განგოგირდების პროცესის ხელსაყრელი თერმოდინამიკური პირობები. ხელშემწყობია ის ფაქტიც, თუ წარმოქმნილი სულფიდი კარგად იხსნება წიღურ ნაღვლებში.

ეფექტურ განმაგოგირდებლებს წარმოადგენენ აგრეთვე სულფიდწარმოქმნელი ელემენტების ნაერთები: კალციუმის კარბიდი და ციანამიდი (CaC₂, CaCN₂), სოდა (Na₂CO₃) და სხვა.

მაგალითისათვის გამოეთვალით გოგირდის მინიმალური კონცენტრაცია, რომელსაც მივიღებთ თუ ფოლადს კალციუმის კარბიდით დაეამუშავებთ. 2.2 და 2.3 ცხრილების გამოყენებით ვპოულობთ:



(2.162)



$$\lg K = \lg \frac{[C]^2 \cdot f_{[C]}^2 \cdot a_{CaS}}{[S]f_{[S]} \cdot a_{CaC_2}} = \frac{259959}{19.15 \cdot 1873} = 7.25. \quad (2.163)$$

თუ დაეუშვებთ, რომ CaC_2 და CaS დამოუკიდებელი ფაზებია ე.ი. მათი აქტიურობები ერთის ტოლია, $f_{[C]}$ -სა და $f_{[S]}$ -ის მნიშვნელობები, $[C]$ -სა და $[S]$ -ის სიმცირის გამო, შეიძლება გავუტოლოთ ერთს. მაშინ მივიღებთ $[C]^2/[S]=1,78 \cdot 10^7$, საიდანაც განხილული პირობებისათვის გოგირდის წონასწორული კონცენტრაცია საკმაოდ მცირე სიდიდეა (1 % C-სათვის $S=5,62 \cdot 10^{-8}$ %). ამრიგად, ჩატარებული ანგარიში მიგვანიშნებს, რომ კალციუმის კარბიდით ფოლადის დამუშავებისას (მაგალითად, ფხენილის შებერვა) პრაქტიკულად გამორიცხულია განგოგირდების პროცესის შემზღვევა თერმოდინამიკური პირობების არსებობა.

2.3.7 ფოსფორი ნალღობებში

ფოსფორი იმ ელემენტების რიცხვს ეკუთვნის, რომლებიც ფოლადში მადნებიდან და საკაზმე მასალებიდან ხედება და უარყოფითად მოქმედებს ლითონის მექანიკურ თვისებებზე. ფოსფორი ზრდის ფოლადის ცივმეტეხობის თვისებას. ფოლადის კვიმტეხობა მუდგენდება იმიტომ, რომ ფოსფორი აფართოებს ლიკვიდუსსა და სოლიდუსს შორის მოთავსებულ ორფაზიან არეს, რაც ხელს უწყობს გამყარების პროცესში ფოსფორის ლიკვაციას.

რკინა ხასიათდება ძლიერი ქიმიური სწრაფვით ფოსფორისადმი. კალორიმეტრიული მეთოდით განსაზღვრულია $\frac{1}{2}P_{(g)} = [P]$ რეაქციის სითბური ეფექტი

$$\Delta H_P^\circ = -140 \pm 35 \text{ კჯ}. \quad (2.164)$$

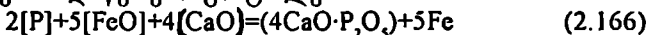
ΔH_P° - ს მნიშვნელობა კარგად ემთხვევა წონასწორობის მეთოდით მიღებულ შედეგს (-123კჯ) [5]. თუ გამოვიყენებთ ΔH_P° -ს კალორიმეტრიულ სიდიდეს და ΔG_{1873} -ის მნიშვნელობას, შეიძლება შევადგინოთ (2.165) რეაქციის ტემპერატურისაგან დამოკიდებულების განტოლება

$$\Delta G_P^\circ = 140000 - 9.6 \cdot T, \text{ ჯ}. \quad (2.165)$$

ფოსფორის ხსნარები რკინაში ხასიათდება მნიშვნელოვანი დადებითი გადახრებით პენრის კანონიდან, რაც მიუთითებს კომპო-

ნენტების ძლიერ ქიმიურ ურთიერთქმედებაზე. ბინარულ ხსნარში ფოსფორის აქტიურობის კოეფიციენტი შეიძლება განისაზღვროს $\lg f_P = 0.062[\%P]$ გამოსახულებიდან, ხოლო რკინაში გახსნილი სხვა ელემენტების გაელენა f_P -ზე შეიძლება ვიპოვოთ ურთიერთ-ქმედების პარამეტრების გამოყენებით (იხ. ცხრილები 2.4 და 2.5).

ფოლადიდან ფოსფორის მოშორება ხორციელდება მისი დაჟანგვით და წიდაში გადაყვანით. წიდაში ფოსფორის აქტიურობის შესამცირებლად უმატებენ კირს. ლითონის დეფოსფორაციის პროცესი აღიწერება განტოლებით



ლიტერატურაში [38] მოცემულია (2.166) რეაქციის წონასწორობის ექსპერიმენტული კვლევის შედეგების მიხედვით შედგენილი წონასწორობის მუდმივას განტოლება

$$\lg K = \lg \frac{X_{(4CaO \cdot P_2O_5)}}{[P]^2 X_{(FeO)}^5 X_{(CaO)}^4} = \frac{40067}{T} - 15,06. \quad (2.167)$$

$X_{(CaO)}$ წარმოადგენს "თავისუფალი" CaO-ს მოლურ წილს, რომელიც არაა დაკავშირებული მჟავა ოქსიდებთან და ეანგარიშობთ შემდეგი ფორმულით $X_{(CaO)} = X_{(CaO)} - 2X_{(SiO_2)} - 4X_{(P_2O_5)} - 2X_{(Al_2O_3)}$. მიღებული მონაცემების საფუძველზე ვასკენით, რომ ლითონის დეფოსფორაციისათვის საჭიროა შედარებით დაბალი ტემპერატურული პირობები და წიდაში FeO-სა და CaO-ს მაღალი შემცველობა.

ბოლო ხანს ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ ფოსფორი გოგირდის მსგავსად შეიძლება გადავიდეს წიდაში არა მარტო დაჟანგული (ფოსფატური) სახით, არამედ აღდგენილი (ფოსფიდური) სახითაც. ამას დიდი მნიშვნელობა აქვს მაღალლევირებული ფოლადების დეფოსფორაციისათვის. პროცესის აღმდგენელ პირობებში ჩატარება გამოირიცხავს ფოლადის შედგენილობაში მყოფი იოლად დასაჟანგებულ ელემენტების (Cr, Mn, Ti და სხ.) დანაკარგებს, მაგრამ აღდგენითი განფოსფორების პროცესის ჩატარებისათვის აუცილებელია მაღალტემპერატურული პირობები და აგრეთვე ლითონის და წიდას ღრმა განჟანგვა. ამისათვის კი საჭიროა თხევად ფოლადში დიდი რაოდენობით ისეთი ელემენტების შეყვანა, რომელთაც ახასიათებთ ჟანგბადთან ძლიერი ქიმიური სწრაფვა. ლიტერატურული მონაცემებით, ლაბორატორიულ პირობებში კარგი შედეგებია მიღწეული Ca-CaF₂ ნალღობის გამოყენებით, რომელიც ლითონში კალციუ-

მის გადასვლის გარეშე უსრუნველყოფს განუანგვის მალალ ხარისხს. უნდა აღინიშნოს, რომ მიუხედავად მრავლად ჩატარებული ლაბორატორიული კვლევისა, ფოლადის ადგენითი განფოყორების პროცესი ჯერ კიდევ არ არის რეალიზებული მეტალურგიულ წარმოებაში.

თ ა ვ ი IV

ფოლადის განუანგვა და ლეგირება

2.4.1. ფოლადის განუანგვის აუცილებლობა

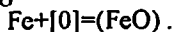
ფოლადის დნობის პროცესისათვის დამახასიათებელია ლითონურ აბაზანაში გახსნილი ზედმეტი მინარეების დაუანგვა. ძირითადად იუანგება სილიციუმი, მანგანუმი, ფოსფორი და ნახშირბადი. ამ მინარეებს უფრო მეტი სწრაფვა აქვს უანგბადთან, ვიდრე რკინას. მიუხედავად ამისა, დნობის პროცესში საკმარაოდენობით იუანგება რკინაც, ვინაიდან მისი მასა ბევრად აღემატება გახსნილი მინარეების მასას, რომლების ამოწვასთან ერთად მცირდება მათივე დამცავი მოქმედება და უანგბადი სულ უფრო ხარბად უანგავს რკინას. ამის გამო, დნობის დასასრულს ლითონში გახსნილია უანგბადის საკმარაოდენობა, რაც აღემატება ნახშირბადთან წონასწორობაში მყოფი უანგბადის კონცენტრაციას. ასეთი ფოლადის ჩამოსხმა-კრისტალიზაციისას გრძელდება ურთიერთქმედება ნახშირბადსა და უანგბადს შორის. ეს იწვევს აიროვან ნახშირუანგის უხვად წარმოქმნას. აირების ნაწილი ასწრებს ფოლადიდან გამოყოფას, ნაწილი კი რჩება ლითონში და იწვევს სხვადასხვა დეფექტს. ფოლადის კრისტალიზაციის პროცესში ნახშირბადის მცირეოდენი დაუანგვა და ნახშირუანგის გამოყოფა დასაშვებია მხოლოდ მდუღარე და ნახევარმშვიდი მარკების ფოლადებისათვის და ისიც, შეზღუდული რაოდენობით. მშვიდი ფოლადის კრისტალიზაციის პროცესში კი საერთოდ დაუშვებელია ნახშირბადის დაუანგვა და ნახშირუანგის წარმოქმნა.

გარდა ზემოთქმულისა, ლითონში დარჩენილი უანგბადი კრისტალიზაციის დროს ურთიერთქმედებს რკინასთან და წარმოქმნის (გამყარებისას) ადვილდნობადი ოქსიდებისა და სულფიდების ევტექტიკურ ნარევეს. იგი ლითონს ანიჭებს ცხელტეხადობის თვი-

სებას და ზოდის (სხიქლის) დაკრისტალების ან ცხელ მდგომარეობაში პლასტიკური დეფორმაციისას (გლინვა, ჰელვა) იწვევს ფოლადის დასკდომას. ამის გამო, ფოლადი საჭიროებს ზედმეტი ჟანგბადის მოშორებას ანუ განჟანგვას. იმისდა მიხედვით, თუ რომელი სახის ფოლადთან გვაქვს საქმე, განჟანგვას ატარებენ სხვადასხვა ხარისხით. მდუღარა ფოლადს განჟანგავენ მცირედ ისე, რომ ლითონში დარჩეს ჟანგბადის გარკვეული რაოდენობა. ჩამოსხმისა და კრისტალიზაციის პროცესში ეს ჟანგბადი შედის ურთიერთქმედებაში ნახშირბადთან, წარმოიქმნება ნახშირჟანგის ბუშტულები, რომელთა ნაწილი გამოიყოფა გარეთ, ხოლო ნაწილი კი რჩება ლითონში ზოდის ქერქის ქვემდებარე ზონაში. რაც შეეხება მშვიდ ფოლადს, მისი განჟანგვა ხდება მაქსიმალურად ისე, რომ გამყარების დროს ნახშირჟანგის ბუშტულების გამოყოფა თავიდან ავიცილოთ. ამრიგად, მშვიდი, ნახევრადმშვიდი და მდუღარე ფოლადები ერთმანეთისაგან განსხვავდება განჟანგვის ხარისხით. ამ ფოლადების მისაღებად გამოყენებული განჟანგვის ხერხი კი შეიძლება იყოს ერთი და იგივე ან სხვადასხვა. ვიდრე განჟანგვის ხერხებს შეეხებოდეთ, განვიხილოთ რკინაში ჟანგბადის ხსნადობის კანონზომიერებანი.

2.4.2. ჟანგბადის ხსნადობა რკინაში

დღეისათვის მიღებულია, რომ ჟანგბადი იხსნება რკინაში ატომური ან იონური ფორმით და ქმნის ჩანერგვის ხსნარს. მოცემულ ტემპერატურაზე ხსნადობის ზღვარს მიღწეული ჟანგბადი რკინასთან იძლევა ქიმიურ ნაერთს – რკინის ქვეჟანგს (FeO)-ს და გამოიყოფა წიდური ფაზის სახით



ამ რეაქციის წონასწორობის მუდმივა $\lg K = \frac{a_{\text{FeO}}}{a_{\text{O}}}$. სადაც $a_{\text{FeO}}=1$, რაც მიგვანიშნებს იმაზე, რომ წიდა შედგება მხოლოდ რკინის ქვეჟანგისაგან. რკინაში ჟანგბადის ხსნადობის დამოკიდებულება ტემპერატურისაგან გამოისახება შემდეგნაირად

$$\lg[\text{O}] = \frac{6320}{T} - 2.734. \quad (2.168)$$

აღნიშნული დამოკიდებულებიდან გამომდინარე, 1600 °C-ზე რკინაში შეიძლება გახსნილ მდგომარეობაში იყოს 0.23 % ჟანგბადი. 2000 °C-ზე რკინაში იხსნება დაახლოებით 1.0 % ჟანგბადი.

ჟანგბადის გახსნა რკინაში შესაძლებელია როგორც აბროვანი უაზიდან, ასევე წიღური ნაღობიდან. ორივე შემთხვევაში ჟანგბადის გადასვლა რკინაში მოიცავს რამდენიმე ეტაპს.

პირველი ეტაპი - ჟანგბადის მოლეკულების კონცენტრირება ლითონის ზედაპირზე; მეორე ეტაპი - ქიმიური აქტი, რომელიც შეიძლება მოიცავდეს ორ სტადიას: 1) ქიმიური ადსორბცია, რომელიც გამოწვეულია ჟანგბადის მოლეკულის განმხილველობით, შემდგომში მისი დისოციაციით ატომებად



$$\lg K = -\frac{12890}{T} - 3.05. \quad (2.169)$$

2) ჟანგბადის ატომების იონისაცია და მათი გადასვლა ლითონში



$$\lg K = \frac{18990}{T} + 3.17. \quad (2.170)$$

მესამე ეტაპი - ჟანგბადის მასის გადაადგილება ლითონში, რომელიც, თავის მხრივ, მოიცავს ორ სტადიას: 1) მოლეკულურ დიფუზიას ლითონის დიფუზიურ შრეში, 2) კონვექციურ დიფუზიას ლითონის მოცულობაში.

ჟანგბადის ხსნარი რკინაში მიეკუთვნება განსავებული ხსნარების ტიპს.

რკინაში გახსნილი ელემენტები გარკვეულ ზეგავლენას ახდენს რკინაში ჟანგბადის ხსნადობაზე და ხსნარში - მის აქტიურობაზე. ჟანგბადის აქტიურობას რკინაში უმინიმუმოდ ზრდის მოლიბდენი, ნიკელი და აზოტი. ყველა სხვა ელემენტი ამცირებს ჟანგბადის აქტიურობას რკინაში. ასე მაგალითად, 1,0 % Mn, Si და Cr რკინაში ამცირებს ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტს შესაბამისად 5, 9 და 27 %-ით, 0,1 % Al კი - 60 %-ით.

რკინაში გახსნილი ჟანგბადი გამოირჩევა ზედაპირული აქტიურობით. იგი ამცირებს თხევადი ლითონის ზედაპირულ დაჭიმულობას (σ), ხოლო სიბლანტეს კი, პირიქით, ზრდის.

თხევადი რკინის აბაზანაში ჟანგბადის კონცენტრაცია დნობის სხვადასხვა პერიოდში სხვადასხვაა და დამოკიდებულია როგორც ლითონის ტემპერატურაზე, ისე - ლითონში გახსნილი ელემენტების რაოდენობაზე, უპირველეს ყოვლისა კი - ნახშირბადის შემცველობაზე. რაც უფრო მეტია ნახშირბადის შემცველობა რკინაში, მით უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს რეაქცია ნახშირბადსა და რკინაში გახსნილ ჟანგბადს შორის, ხოლო ნახშირბადის

კონცენტრაციის შეიცირებასთან ერთად ლითონში იზრდება ჟანგბადის რაოდენობა. რადგან წონასწორობასთან მიახლოებისას ნახშირბადის და ჟანგბადის კონცენტრაციების ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა $K=[C] \cdot [O]=const$ (სურ. 2.5). ამრიგად, ღუმელში ფოლადის დნობის პროცესის დამთავრების მომენტში ჟანგბადის შემცველობა ლითონში საკმაოდ დიდია და აუცილებელია მისი მოცილება განჯანგვის მეშვეობით.

დღეისათვის ფოლადის განჯანგვის სამი ხერხია (კნობილი: ლექქითი, დიფუზიური (ექსტრაქციული) და ვაკუუმური. განვიხილოთ თითოეული ცალ-ცალკე.

2.4.3. ფოლადის განჯანგვა ლექქითი მეთოდით

ფოლადის ლექქით განჯანგვის უპირველესი მიზანია თხევად ლითონში გახსნილი ჟანგბადის [O] რაოდენობის შემცირება. ამ მიზნით, ფოლადში შეჰყავთ განმჯანგველი ელემენტები (Mn, Si, Al, Ti, V და სხვა) სუფთა ლითონების ან ფეროშენადნობების სახით, რომლებსაც უფრო მეტი სწრაფვა აქვთ ჟანგბადთან. ვიდრე რკინას.

თხევად ფოლადში განმჯანგველის დამატების შემდეგ, წარმოიქმნება ახალი ფაზა განმჯანგველის და ჟანგბადის ოქსიდური ნაერთის სახით, რომელიც ზოგადად შეიძლება იყოს აირად {CO}. თხევად ან მყარ მდგომარეობაში. როგორც წესი, ოქსიდური ჩანართი გამოიყოფა ერთგვაროვანი ოქსიდის (R_xO_y), ოქსიდური ნაერთის ($FeO \cdot R_xO_y$) ან ოქსიდების ნარევის სახით. თუ სისტემა წონასწორობაშია მოყვანილი, რეაქციის პროდუქტების შედგენილობის დადგენა შესაძლებელია სათანადო ფაზური დიაგრამების მეშვეობით.

განჯანგვის შედეგად წარმოქმნილი ნაერთი – ოქსიდური ნაწილაკი ადვილად მიჰყვება ლითონის კონვექციურ ნაკადს, ადის მის ზედაპირზე და გადადის წიდაში. დისპერსული ფაზების ასეთი გადანაწილება ძალიან გეგონებს ლექქის პროცესს და აქედან წარმოდგება განჯანგვის ამ ხერხის სახელწოდებაც.

ზოგადად განჯანგვის პროცესი აისახება შემდეგი სქემით

$$x[R] + y[O] = (R_xO_y). \quad (2.171)$$

წონასწორობის დროს ჟანგბადსა და განმჯანგველს შორის შეფარდება გამოისახება (2.171) რეაქციის წონასწორობის მუდმივათი $K=[\%R]^x \cdot [\%O]^y$, სადაც [%R] და [%O] შესაბამისად განმჯანგველისა და ჟანგბადის მასური კონცენტრაციებია.

როგორც უკვე იყო აღნიშნული, ჟანგბადის ხსნარი თვით სუფთა რკინაშიც არაა იდეალური. იგი განზავებულ ხსნარებს მიეკუთვნება. საკმაოდ შორსაა იდეალურისაგან Fe-O-R-ის ხსნარებიც. ამის გამო, წონასწორობის კონსტანტას გამოსახავენ ისეთი თერმოდინამიკური ფუნქციებით, როგორიცაა აქტიურობა (a) და აქტიურობის კოეფიციენტი (f), სახელდობრ:

$$K = a_R^x \cdot a_O^y = f_R^x [\%R]^x \cdot f_O^y [\%O]^y,$$

აქედან

$$[\%O] = \sqrt[y]{\frac{K}{f_R^x [\%R]^x \cdot f_O^y}}, \quad (2.172)$$

სადაც a_R და a_O , f_R და f_O განმჟანგველი ელემენტისა და ჟანგბადის აქტიურობები და აქტიურობის კოეფიციენტებია.

(2.172) განტოლებიდან ჩანს, რომ, რაც უფრო მეტია განმჟანგველი ელემენტისა და ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტები, მით ნაკლები იქნება რკინაში გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობა. f_R და f_O შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ტოლობებიდან: $f_R = f_R^1 \cdot f_R^O$ და $f_O = f_O^1 \cdot f_O^R$, სადაც f_R^1 და f_O^1 , შესაბამისად, განმჟანგველი ელემენტისა და ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტებია რკინის ბინარულ განზავებულ ხსნარებში, ხოლო f_R^O და f_O^R - აქტიურობის კოეფიციენტები, რომლებიც გამოსახავენ განმჟანგველისა და ჟანგბადის ურთიერთქმედებას სამკომპონენტო Fe-R-O სისტემაში. მაშინ, განტოლება (2.172) შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$K = a_R^x \cdot a_O^y = (f_R^1)^x (f_R^O)^y (\%R)^x (f_O^1)^y (f_O^R)^y (\%O)^x \quad (2.173)$$

განზავებულ ხსნარებში f_R^O და f_O^R ერთმანეთთან დაკავშირებულია შემდეგი თანაფარდობით

$$\frac{\partial \lg f_R^O}{\partial [\%O]} = \frac{M_R}{M_O} \cdot \frac{\partial \lg f_O^R}{\partial [\%R]},$$

სადაც M_R და M_O - განმჟანგველი ელემენტის და ჟანგბადის ატომური მასები, ხოლო

$$\frac{\partial \lg f_R^O}{\partial [\%O]} = c_R^O \quad \text{და} \quad \frac{\partial \lg f_O^R}{\partial [\%R]} = c_O^R$$

ურთიერთქმედების პარამეტრებია, რომელთა მეშვეობითაც, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ხდება შესაძლებელი f_R და f_O -ის რაოდე-

ნობრივი შეფასება განმჟანგველისა და ჟანგბადის კონცენტრაციების ცვალებადობის შემთხვევაში.

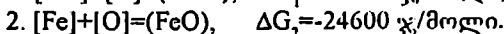
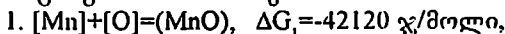
როდესაც განმჟანგველის რაოდენობა თხევად რკინაში დიდია (ეთქვათ, სილიციუმისათვის $>0,2\%$, ალუმინისათვის $>0,02\%$, მაშინ f'_R და f'_O -ის მნიშვნელობები შეიძლება უგულებელვყოთ. რადგან ჟანგბადის მცირე რაოდენობის სემოქიმედება განმჟანგველის და ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტებზე უმნიშვნელოა. ამიტომ, (2.173) განტოლება შეიძლება ჩაიწეროს უფრო მარტივად

$$K = (f'_R)^x [\%R]^y (f'_O)^z [\%O]^y \quad (2.174)$$

განმჟანგველების უმრავლესობა განსავებულ ხსნარებში ემორჩილება პენრის კანონს და მათი აქტიურობის კოეფიციენტები კონცენტრაციების საკმაოდ დიდ დიაპაზონში თითქმის ერთის ტოლია. ამიტომ (2.174) განტოლებას, ხშირ შემთხვევაში, წარმოსახავენ უფრო მარტივად

$$K = [\%R]^x (f'_O)^y [\%O]^y \quad (2.175)$$

ელემენტის განჟანგვის უნარი შეიძლება შევაფასოთ ორი რეაქციის $[Fe]+[O]=(FeO)$ და $x[R]+y[O]=(R_xO_y)$ იზობარულ-იზოთერმული პოტენციალების (ΔG) ურთიერთშედარებით. რაც უფრო უარყოფითია ΔG -ს მნიშვნელობა განმჟანგველი ელემენტის (R) ჟანგბადთან შეერთების შემთხვევაში, რკინის ჟანგბადთან შეერთებასთან შედარებით, მით უფრო დიდია განმჟანგველი ელემენტის განმჟანგველუნარიანობა*. მაგალითისთვის, ავიღოთ რკინის განჟანგვა მანგანუმით $1600^\circ C$ -ზე:



თუ შევადარებთ ΔG_1 და ΔG_2 -ს დავინახავთ, რომ ჟანგბადთან მანგანუმის შეერთების უნარი რკინასთან შედარებით 1,7-ჯერ მეტია.

განჟანგვის დროს ჯიბსის ენერჯიის ცვალებადობას (ΔG) და განჟანგვის მუდმივას (K) შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S = -RT \ln K$, საიდანაც შესაძლებელია მივიღოთ განჟანგვის მუდმივას ტემპერატურული დამოკიდებულება:

$$\ln K = -\frac{\Delta G}{RT} = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (2.176)$$

განმჟანგველი ელემენტის განჟანგვის უნარი შეიძლება განისაზღვროს როგორც თერმოდინამიკური გათვლებით, ასევე ექსპე-

* რედაქტორისაგან: „განმჟანგველუნარიანობა“ ანუ „განმჟანგველუნარიანობა“ იგივეა, რაც „განჟანგვის უნარი“ ანუ „განმჟანგავი უნარი“.

რიმენტულად. უკანასკნელს განეკუთვნება მეთოდი, რომლის მეშვეობითაც შეისწავლება წონასწორობა აიროვან ფაზასა (P_{H_2O}/P_{H_2}) და გამდნარ რკინას შორის. ბინარული (Fe-O) და სამკომპონენტური (Fe-R-O) სისტემისათვის აიროვან ფაზაში ჟანგბადის ზუსტად განსაზღვრული პოტენციალის დროს ($P_{H_2O}/P_{H_2} = \text{const}$) აღვნიშნავთ

შემდეგ ტოლობას $a_{O(O)} = a_{O(Fe-R)} = a_{O(Fe)}$, სადაც $a_{O(O)}$, $a_{O(Fe-R)}$ და $a_{O(Fe)}$ ჟანგბადის აქტიურობებია აიროვან ფაზაში, თხევად რკინაში (რომელშიც გახსნილია განმჟანგველი ელემენტი) და სუფთა თხევად რკინაში. ეს ტოლობა შეიძლება ასე გამოისახოს:

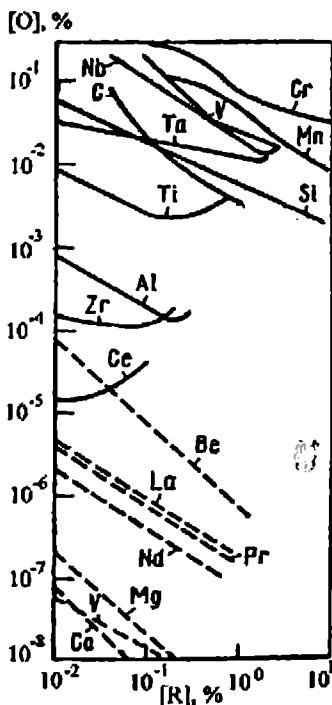
$$f_O^R [\%O]_{(Fe-R)} = f_O^1 [\%O]_{(Fe)}, \text{ საიდანაც } f_O^R = \frac{f_O^1 [\%O]_{(Fe)}}{[\%O]_{(Fe-R)}}. \text{ თუ მივი-}$$

$$\text{ღებთ } f_O^1 = 1, \text{ მაშინ } f_O^R = \frac{[\%O]_{(Fe)}}{[\%O]_{(Fe-R)}}.$$

აქედან გამომდინარე, f_O^R -ის განსაზღვრისათვის საკმარისია ვიცოდეთ ჟანგბადის კონცენტრაცია სუფთა რკინაში $[\%O]_{(Fe)}$ და ჟანგბადის კონცენტრაცია რკინაში, რომელშიც გახსნილია განმჟანგველი ელემენტი $[\%O]_{(Fe-R)}$.

გასული საუკუნის 70-იანი წლებიდან დიდი გავრცელება პოვა თხევად ფოლადში ჟანგბადის აქტიურობის განსაზღვრის მეთოდი, რომელიც ეყუდნება მყარ ელექტროლიტში ელექტრომიმოძრაველი ძაღის (კვლილების გაზომვას ლითონურ ხსნარში ჟანგბადის კონცენტრაციისაგან დამოკიდებულებით.

დღეისათვის კარგადაა შესწავლილი განმჟანგველი ელემენტების განმჟანგველუნარიანობა. სურათზე 2.9 ნაჩვენებია 1600 °C-ზე ელემენტების განჟანგვის უნარი. როგორც სურათიდან ჩანს, ყველაზე სუსტ განმჟანგველებს განეკუთვნება Mn, Si,



სურ. 2.9. ელემენტების განჟანგვის უნარი თხევად რკინაში 1600 °C-ზე

ხოლო ყველაზე ძლიერს – Al, Ce და Ca. განვიხილოთ ზოგიერთი მათგანი ცალ-ცალკე.

2.44. განჯანგვა მანგანუმით

მანგანუმით და მის ფუძესე არსებული შენადნობებით განჯანგვენ თითქმის ყველა ფოლადს. ვინაიდან მისი რიგითი (ანუ არალეგირებული) მარკებიც კი შეიცავს ამ ქიმიური ელემენტის 0,30 %-ს მაინც. ამასთანავე, რიგით ფოლადებში მანგანუმის შემცველობის ზედა ზღვარია 0,80 % (მათ შორის დაბალნახშირბადიან მარკებშია 0,50–0,65 %)*.

მანგანუმი ფოლადში ძირითადად შეაქვთ ფერომანგანუმისა და სილიკომანგანუმის სახით**, რადგან ეს ფეროშენადნობები სხვა განმჯანგველებთან შედარებით უფრო იაფია. მანგანუმი ფოლადისთვის (რკინისათვის) სუსტი განმჯანგველია. 1600 °C-ზე მანგანუმის 0,2 და 0,8 მასური % კონცენტრაციების დროს თხევადი რკინა შესაბამისად შეიცავს 0,15 და 0,1 % ჟანგბადს. ფოლადში მანგანუმის შეყვანისას წარმოიქმნება განჯანგვის პროდუქტები, რომლებიც MnO-სა და FeO-ს შეიცავენ. MnO-ს კონცენტრაცია დამოკიდებულია ლითონში მანგანუმის შემცველობასა და ტემპერატურაზე. ფაზური დიაგრამების მიხედვით, წონასწორობის დროს FeO და MnO წარმოქმნის ხსნარებს როგორც მყარ, ასევე თხევად მდგომარეობაში. რკინის მანგანუმით განჯანგვის რეაქცია გამოისახება შემდეგი ტოლობით:



რომლის წონასწორობის მუდმივას შემდეგი სახე აქვს:

$$K_{\text{Mn}} = \frac{(\text{MnO})}{(\text{FeO})[\% \text{Mn}]}; \lg K_{\text{Mn}} = \frac{6440}{T} - 2,95. \quad (2.178).$$

* რედაქტორისაგან: გარდა განჯანგვისა, მანგანუმი ასუსტებს გოგირდის მანვნი გაფლენას ფოლადის პლასტიკურობაზე დაკრისტალუბისა და წნევით დამუშავებისას. უფრო მეტიც, ამ ქიმიური ელემენტების შემცველობების გარკვეული თანაფარდობისას ფოლადს აღარ ახასიათებს ცხელმეტეხობა და წითელმეტეხობა. თუ ფოლადში 0,80 % ან მეტი მანგანუმი, იგი გამოყენებულია როგორც მალეგირებელი ელემენტი.

** რედაქტორისაგან: „სილიკომანგანუმის“ ნაცვლად დღეისათვის ადგილს იმკვიდრებს მისი თანამედროვე და უფრო ზუსტი სახელწოდება „ფეროსილიკომანგანუმი“.

აქ (FeO) და (MnO) რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგების კონცენტრაციებია (მასური % ან მოლური წილი) წიდაში. მათი გამოყენება ამ ქიმიური ელემენტების აქტიურობების ნაცვლად სრულიად დასაშვებია, რადგან MnO-FeO-ს წილური ხსნარები ძალზე ახლოსაა იდეალურ ხსნარებთან. თხევადი რკინის მანგანუმით განუანგვის პროცესი საკმაოდ სრულადაა შესწავლილი. სხვადასხვა მეკლევართა შედეგები კარგად ემთხვევა ერთმანეთს.

დადგენილია, რომ მანგანუმის უანმუანგველუნარიანობაზე დიდ გავლენას ახდენს წილის შედგენილობა ანუ ფოლადის ღრობის პროცესის ნაირსახეობა. მუავეამონაგიან ღუმელში (მარტენის მუავე პროცესი) – წიდა გაჯერებულია მუავე თვისებების მქონე ოქსიდის ნაერთებით. ამ შემთხვევაში, MnO-ს აქტიურობა ბევრად უფრო მცირეა, ვიდრე ფუძე წილებში და მანგანუმის განმუანგველუნარიანობაც საგრძნობლად იზრდება.

2.4.5. სილიციუმით განუანგვა

სილიციუმი მანგანუმთან შედარებით უფრო ძლიერი განმუანგველია, სილიციუმით ფოლადის განუანგვის რეაქციის თერმოდინამიკური მახასიათებლები შემდეგი განტოლებებით გამოისახება:

$$[\text{Si}] + 2[\text{O}] = (\text{SiO}_2) \quad \Delta G = -596785 + 231,21T, \quad (2.179)$$

$$\begin{aligned} \lg K_{\text{Si}} &= -\frac{31180}{T} + 12,08; \quad K_{\text{Si}} = a_{[\text{Si}]} \cdot a_{[\text{O}]^2} = \\ &= [\% \text{Si}] [\% \text{O}]^2 \cdot f_{[\text{Si}]} \cdot f_{[\text{O}]}^2 = [\% \text{Si}] [\% \text{O}]^2. \end{aligned} \quad (2.180)$$

მრავალრიცხოვანი კვლევებით დადგინდა, რომ სილიდე $[\% \text{Si}] \cdot [\% \text{O}]^2$ ინარჩუნებს მუდმივობას ფოლადში სილიციუმის 2 %-ის შემცველობამდე. ეს იმით აიხსნება, რომ ნალღობში სილიციუმის კონცენტრაციის ზრდა იწვევს $f_{[\text{Si}]}$ სიდიდის ზრდას და, შესაბამისად, $f_{[\text{O}]}$ -ის შემცირებას. ეს ცვლილებები ისეთნაირად მიმდინარეობს, რომ ნამრავლი $f_{[\text{Si}]} \cdot f_{[\text{O}]}$ ყოველთვის მუდმივი და ერთის ტოლი სიდიდეა. ფოლადში სილიციუმის დაბალი და უანგბადის მაღალი შემცველობისას განუანგვის პროდუქტს წარმოადგენს არა სუფთა SiO_2 , არამედ სხვადასხვა შედგენილობის $(\text{FeO})_x(\text{SiO}_2)_y$ სილიკატები. რაოდენობრივი ფარდობა $X_{(\text{FeO})}$ და $X_{(\text{SiO}_2)}$ სილიდეებს შორის შეიძლება გამოვთვალოთ $2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + 2\text{Fe}$ ($\Delta G^\circ = -354470 + 126,32T$) რეაქციის წონასწორობის მუდმივას ტემპერატურული დამოკიდებულებიდან

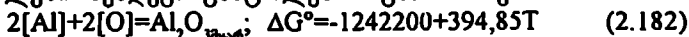
$$\lg K = \frac{X_{\text{SiO}_2}}{X_{\text{FeO}}^2 [\% \text{Si}]} = \frac{18520}{T} - 6,6. \quad (2.181)$$

ამ განტოლების მიხედვით ჩატარებულმა გათვლებმა გვიჩვენა, რომ ფოლადში 0,1 და 0,3 % სილიციუმის შემცველობისას FeO-ს კონცენტრაცია განუანგვის პროდუქტებში, შესაბამისად, არის 10 და 4 %. თხევად რკინაში სილიციუმის კონცენტრაციის თანმიმდევრული ზრდა დაკავშირებულია განუანგვის ერთი სახის პროდუქტების (რკინის სილიკატები) მეორეში (სუფთა SiO₂) გადასვლასთან.

* სილიციუმის განუანგავუნარიანობაზე გავლენას ახდენს წილის შედგენილობა. ფუძე წილების შემთხვევაში SiO₂ წარმოქმნის ნაერთებს ისეთ ფუძე ოქსიდებთან, როგორცაა: CaO, MgO, MnO და ამის გამო, სილიციუმის ოქსიდის აქტიურობა წიდაში მცირდება, რაც საბოლოო ჯამში განაპირობებს სილიციუმის განუანგველუნარიანობის გაზრდას.

2.4.6. ალუმინით განუანგვა

ალუმინი ძალიან ძლიერი განუანგველია და ამის გამო იგი ფართოდ გამოიყენება ფოლადის გასაუანგავად. ალუმინის განუანგავი უნარის ექსპერიმენტული კვლევა დაკავშირებულია მნიშვნელოვან სიძნელეებთან, კერძოდ, ლითონურ ნაღვლებში ალუმინის, ჟანგბადის მცირე კონცენტრაციებისა და აირად ფაზაში დაბალი დამუანგავი პოტენციალის განსაზღვრის დიდ ცდომილებებთან. მაგალითად, ალუმინის 0,001 % ნარჩენი კონცენტრაციისას ლითონში გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობა 0,01 %-ს შეადგენს, რაც ამ ორივე ელემენტის განსაზღვრის სიზუსტეს უახლოვდება. მიუხედავად ამისა, დღეისათვის ალუმინის განუანგავუნარიანობა კარგადაა შესწავლილი. დადგენილია, რომ ალუმინის მცირე დანამატებისას (<0,001) წარმოიქმნება რთული ჩანარები, რომლებიც შეიცავენ შპინელებს (FeO·Al₂O₃) ან Al₂O₃-ის და FeO-ს ხსნარებს. ალუმინის ჭარბი რაოდენობის შემთხვევაში წარმოიქმნება სუფთა Al₂O₃. ალუმინით ფოლადის განუანგვის რეაქციის თერმოდინამიკური მახასიათებლები შემდეგი განტოლებით გამოისახება



მრავალრიცხოვან კვლევათა ლიტერატურაში მოყვანილი შედეგების განზოგადების საფუძველზე რეკომენდებულია (2.182) რეაქციის წონასწორობის მუდმივას ტემპერატურისაგან დამოკიდებულების შემდეგი გამოსახულება

$$\lg K_{Al} = \lg a_{[Al]}^2 \cdot a_{[O]}^3 = -\frac{64900}{T} + 20.63.$$

პრაქტიკული ანგარიშებისათვის შესაძლებელია დაეუშვათ $a_{[Al]} = [\%Al]$ და $a_{[O]} = [\%O]$.

ასეთი დაშვების შემთხვევაში შეიძლება გამოვიანგარიშოთ ჟანგბადის მოსალოდნელი კონცენტრაცია რკინაში 1600 °C-ზე ალუმინის სხვადასხვა კონცენტრაციის დროს

[Al], % ... 0,004 0,006 0,01 0,02 0,05 0,1.

[O], % ... 0,0031 0,0024 0,0017 0,0011 0,0006 0,0004.

როგორც ამ მონაცემებიდან ჩანს, ალუმინის უმნიშვნელო კონცენტრაციაც კი ძლიერ ამცირებს ჟანგბადის შემცველობას რკინაში.

2.4.7. ტიტანით განჟანგვა

ტიტანი ძლიერ განმჟანგველთა რიგს განეკუთვნება. მისი გამოყენება განმჟანგველად ხშირ შემთხვევაში ხელსაყრელია იმიტომ, რომ ამ ელემენტს გარკვეულწილად შეუძლია შეამციროს გოგირდის და აზოტის მანეჟი ზემოქმედება ფოლაღზე.

ტიტანით რკინის განჟანგვის დროს, შესაძლებელია მივიღოთ სხვადასხვა სტექიომეტრული აღნაგობის ჟანგეულების მთელი გამა:

$$[Ti]+[O]=TiO; \Delta G^{\circ}=-81700+29,7T; \lg K^* = -\frac{17858}{T} + 6,551, (2.183)$$

$$2[Ti]+3[O]=Ti_2O_3; \Delta G^{\circ}=-248300+82,13T; \lg K^* = -\frac{18091}{T} + 5,984, (2.184)$$

$$3[Ti]+5[O]=Ti_3O_5; \Delta G^{\circ}=-402480+132,52T; \lg K^* = -\frac{17595}{T} + 5,793, (2.185)$$

$$[Ti]+2[O]=TiO_2; \Delta G^{\circ}=-156004+55,32T; \lg K^* = -\frac{17050}{T} + 6,046. (2.186)$$

ჟანგეულების ნაირსახეობა დამოკიდებულია ტიტანის კონცენტრაციაზე რკინაში. ასე მაგალითად, რკინაში ტიტანის 0,001 % შემცველობის შემთხვევაში შეიძლება მივიღოთ FeO·TiO₂; 0,004 % ტიტანის შემცველობის დროს TiO₂ - Ti₃O₅; 0,1 % Ti-ის დროს - Ti₃O₅ - Ti₂O₃; 0,2 % Ti-ის დროს კი - Ti₂O₃ და ა.შ.

*. რედაქტორისაგან: წონასწორობის მუდმივა გამოხატულია ნერნსტის თანახმად.

2.4.8. ცირკონიუმით განჯანგვა

ცირკონიუმის ოქსიდის ZrO_2 მაღალი სტაბილურობა მიგვიანიშნებს მის ძლიერ განმჯანგვეუნარიანობაზე. ცირკონიუმით რკინის განჯანგვის თავისუფალი ენერგიის ცელილება და წონასწორობის მუდმივა თავდაპირველად გამოითვალეს თერმოდინამიკური გაანგარიშებებით:



$$\lg K_{Zr} = -\frac{40916}{T} + 12,198 \quad (2.187).$$

შემდგომში მყარი ელექტროლიტის ელექტრომაგნიტური ელემენტი ძალის მეთოდის გამოყენებით, ექსპერიმენტულად შეისწავლეს ცირკონიუმის განმჯანგველუნარიანობა 1500, 1600 და 1650 °C-ზე რკინაში ნარჩენი ცირკონიუმის 0,001-დან 0,04 %-მდე შემცველობისას. დადგენილია, რომ $[%Zr][O]^2$ ნამრავლის სიდიდე ერთი და იგივე ტემპერატურის პირობებში დამოკიდებულია ნარჩენი ცირკონიუმის კონცენტრაციაზე რკინაში.

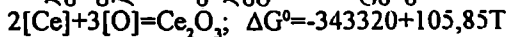
ზემოთ აღნიშნულ ზღვრებში ცირკონიუმით განჯანგვისას წონასწორობის მუდმივა გამოისახება შემდეგი განტოლებით

$$\lg K_{Zr} = -\frac{43404}{T} + 12,69. \quad (2.188).$$

როგორც (2.187) და (2.188) განტოლებებიდან ჩანს, ცირკონიუმი ხასიათდება ძალზე დიდი განმჯანგველუნარიანობით ($K_{Zr}=3,28 \cdot 10^{11}$ 1600 °C-ზე).

2.4.9. ცერიუმით განჯანგვა

იშვიათ მიწათა ლითონების ჟანგულები გამოირჩევა დიდი მდგრადობით. ეს მიგვიანიშნებს იმაზე, რომ ამ ელემენტების განმჯანგველუნარიანობა, მათ შორის ცერიუმისა, ძალზე დიდია. თერმოდინამიკური გათვლებით ცერიუმით რკინის განჯანგვის შემთხვევაში მიღებულია შემდეგი მონაცემები:



$$\lg K_{Ce} = -\frac{75040}{T} + 23,137 \quad (2.189)$$

ცერიუმის განმჯანგველუნარიანობა შეისწავლეს აგრეთვე ექსპერიმენტულად. მიღებული მონაცემების საფუძველზე დადგინდა წონასწორობის მუდმივას შემდეგი განტოლება

$$\lg K_{ce} = -\frac{51220}{T} + 17.08. \quad (2.190)$$

ამ განტოლებიდან გამოიმდინარე, 1600 °C-ზე რკინის ცერიუმით განქანგვის შემთხვევაში 0,01 % ნარჩენ ცერიუმს შეესაბამება რკინაში ჟანგბადის წონასწორული კონცენტრაცია $5,37 \cdot 10^{-11}$, რაც თავისთავად მიგვანიშნებს ცერიუმის ძალიან დიდ განმჟანგველუნარიანობაზე. ფოლადის მეტალურგიაში ლითონის გასაჟანგად იყენებენ არა სუფთა ცერიუმს, არამედ იშვიათ მიწათა ლითონების შენადნობებს „მიშმეტალის“ სახით, რომელშიც 45–50 % Ce-ის გარდა, არის 22–25 % ლანთანი, 15–17 % ნეოდიმი და 8–10 % სხვა იშვიათ მიწათა ელემენტები 5 %-მდე რკინასა და 0,1–0,3 % სილიციუმთან ერთად.

2.4.10. კალციუმითა და ბარიუმით განქანგვა

ამ ლითონების ჟანგეულების მდგრადობიდან გამოიმდინარე, ორივე ეს ელემენტი ძალიან ძლიერ განმჟანგველთა რიცხვს განეკუთვნება, თუმცა სინამდვილეში ამ ელემენტებით ფოლადის განჟანგვა ნაკლებად ეფექტურია. ეს გამოწვეულია, უპირველეს ყოვლისა იმით, რომ ორივე ლითონი ცუდად იხსნება რკინაში. კალციუმის ხსნადობა რკინაში 1600 °C-ზე არ აღემატება 0,012 %-ს, ხოლო ბარიუმი კი პრაქტიკულად უხსნადია.

გარდა ამისა, დუღილის ძალიან დაბალი (1484 °C) ტემპერატურის გამო 1600 °C-ზე კალციუმი მთლიანად ორთქლად იქცევა, რაც ხელს უშლის მის გამოყენებას ფოლადის განმჟანგველად. ამ უარყოფითი მხარეების ნაწილობრივი ნიველირებისათვის პრაქტიკაში იყენებენ არა სუფთა Ca-სა და Ba-ს, არამედ მათ შენადნობებს სილიციუმთან და სხვა განმჟანგველ ელემენტებთან (Al, Mn და ა.შ.). ასეთ შენადნობებში კალციუმის და ბარიუმის შემცველობა მერყეობს 5-დან 30 %-მდე.

სილიციუმთან კალციუმიცა და ბარიუმიც იძლევა საკმაროდ მდგრად სილიციდებს, რაც ამ ელემენტების განმჟანგველად გამოყენების ეფექტურობას საგრძნობლად ზრდის. გარდა ამისა, კალციუმი ძალიან ეფექტური დესულფურატორი და მოდიფიკატორია, რის გამოც ფოლადის წარმოების პრაქტიკაში ამ ელემენტს დიდი გამოყენება აქვს სილიციუმთან შენადნობის სახით.

თერმოდინამიკური გათვლებით მიღებულია კალციუმის და ბარიუმის, როგორც განმჟანგველების, შემდეგი განტოლებები:



$$\lg \frac{P_{\text{Ca}}[\text{O}] \cdot f_{\text{O}}^{\text{Ca}} \cdot f_{\text{Ca}}^{\text{O}}}{a_{\text{CaO}}} = -\frac{34680}{T} + 10,035, \quad (2.191)$$



$$\lg \frac{P_{\text{Ba}}[\text{O}] \cdot f_{\text{O}}^{\text{Ba}} \cdot f_{\text{Ba}}^{\text{O}}}{a_{\text{BaO}}} = -\frac{30950}{T} + 9,260. \quad (2.192)$$

ამ განტოლებებიდან გამოვძინარე, კალციუმითა და ბარიუმით ფოლადის განუანგვის წონასწორობის მუდმივებია $3,3 \cdot 10^9$ და $5,4 \cdot 10^8$ შესაბამისად, რაც იმას ნიშნავს, რომ კალციუმის ორთქლის დრეკადობის მაღალი მაჩვენებლების მიუხედავად, კალციუმით ფოლადის განუანგვის შემთხვევაში $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ -ზე ლითონში უანგბადის წონასწორობის კონცენტრაცია არ აღემატება 10^{-5} %-ს.

2.4.11. კომპლექსური განუანგველებით განუანგვა

ფოლადსადნობ პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება კომპლექსური განუანგველები, რომლებიც წარმოადგენენ ორი ან მეტი კომპონენტის შენადნობებს (სილიკომანგანუმი, სილიკოკალციუმი, სილიციუმი, ალუმინის, მანგანუმის, კალციუმისა და ბარიუმის შენადნობი და სხვა). კომპლექსური განუანგველების გამოყენებას განსაზღვრავს რამდენიმე გარემოება, სახელდობრ, კომპლექსური შენადნობებით განუანგვის დროს ქიმიური რეაქციის პროდუქტებად წარმოდგება სხვადასხვა ოქსიდების ხსნარები, რომლებშიც ცალკეული ოქსიდის აქტიურობა ნაკლებია ერთზე. ამის გამო, განუანგველი ელემენტის ერთი და იგივე კონცენტრაციის დროს უანგბადის ნარჩენი შემცველობა რკინაში საგრძნობლად ნაკლებია, ვიდრე ერთი ელემენტის განუანგველად გამოყენების შემთხვევაში. გარდა ამისა, წარმოქმნილი ოქსიდური ხსნარების დნობის ტემპერატურა დაბალია, რაც ხელს უწყობს ოქსიდური ჩანართების გამსხვილებას და რკინიდან მათი მოცილების (ამოტივტივების) პროცესს. მაგალითად, $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ -ზე თხევად რკინაში $0,2 \%$ სილიციუმთან წონასწორობაშია გახსნილი უანგბადის $0,012 \%$. მაშინ, როცა სილიკომანგანუმის გამოყენების დროს, მანგანუმის $0,5 \%$ -ის დამატებისას სილიციუმის იგივე რაოდენობას შეესაბამება უანგბადის უფრო დაბალი წონასწორობის კონცენტრაცია – $0,008 \%$. ამრიგად, მანგანუმის დამატებით იზრდება სილიციუმის განუანგვაუნარიანობა. მანგანუმი და სილიციუმი ცალ-ცალკე და ერთად

ზრდის ალუმინის განმჟანგავენარიანობას. კომპლექსური შენადნობებით განჟანგვის დროს მიიღება სხვადასხვა შედგენილობის წიღური ნაღნობები – სილიკატები, ალუმოსილიკატები. კალციუმ-ალუმოსილიკატები, შპინელები და სხვა. ასეთი სისტემების თერმოდინამიკური გათვლებისათვის საჭიროა ვიცოდეთ ოქსიდურ ხსნარებში ცალკეული კომპონენტის აქტიურობის რიცხვითი მნიშვნელობა. დღეისათვის საკმაოდ კარგადაა შესწავლილი ოქსიდური სისტემები: CaO-SiO_2 ; MnO-SiO_2 ; $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$; FeO-SiO_2 ; $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. ამ მონაცემების გამოყენებით, შესაძლებელია დადგინდეს რკინაში ჟანგბადის ნარჩენი კონცენტრაცია სილიკო-მანგანუმის, სილიკოკალციუმისა და სილიკოკალციუმალუმინის კომპლექსური შენადნობებით განჟანგვის შემთხვევაში.

2.4.12. ფოლადის დიფუზიური განჟანგვა

ფოლადის განჟანგვა წიღის საშუალებით ცნობილია დიფუზიური განჟანგვის სახელწოდებით. იგი ემყარება ფაზათა შორის ნივთიერების წონასწორული განაწილების კანონს. რკინის და ჟანგვის შედეგად წარმოქმნილი რკინის ქვეჟანგი (FeO) სხვა ჟანგულებთან ერთად (გარდა ნახშირჟანგისა, რომელიც აიროვან მდგომარეობაში ცილდება) გადადის წიდაში. წიდა და თხევადი ლითონი მთელი დნობის განმავლობაში მჭიდრო შეხებაში იმყოფება ერთმანეთთან. განაწილების კანონის თანახმად, ურთიერთ-შეხებაში მყოფ ერთმანეთში უხსნად ორ ფაზაში გახსნილი ნივთიერების ქიმიური პოტენციალი მიისწრაფვის გათანაბრებისაკენ. ამ დროს ორივე ფაზაში გახსნილი კომპონენტის კონცენტრაცია მიისწრაფვის წონასწორული განაწილებისაკენ და მათი ფარდობა ანუ განაწილების კოეფიციენტი (L) მოცემულ ტემპერატურაზე მუდმივი სიდიდეა. დიფუზიური განჟანგვა ზოგადად შემდეგი განტოლებით გამოიხატება



თუ დავეშვებით, რომ წიდა წარმოადგენს იონურ ხსნარს, მაშინ გვექნება



წიღის განმჟანგავენარიანობის შეფასება ხდება ჟანგბადის წონასწორული განაწილების კოეფიციენტის საშუალებით

$$L_0 = \frac{(\text{Fe}^{2+})(\text{O}^{2-})}{[\text{O}]} \quad (2.195)$$

ან იონების ნაცვლად თუ გამოვიყენებთ მათ აქტიურობას, მივიღებთ
150

$$L_0 = \frac{a_{\text{Fe}^{2+}} \cdot a_{\text{O}^{2-}}}{[\text{O}]} \quad (2.196)$$

რეალურ პირობებში სხვადასხვა შედგენილობის სამრეწველო წიდელებისათვის რკინის ქვეჟანგის აქტიურობა სხვადასხვანაირია. მაგალითად, მუავე წიდელებში, რომლის ძირითად კომპონენტს წარმოადგენს SiO_2 , რკინის ქვეჟანგის აქტიურობა მინიმალურია, ხოლო ფუძე წიდელებში FeO -ს აქტიურობა ბევრად დიდია და დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ არის ის დაკავშირებული წილის სხვა ჟანგეულებთან.

თუ დავარღვევთ წიდასა და ლითონის შორის დამყარებულ ჟანგბადის წონასწორულ განაწილებას, მაგალითად, წილის განჟანგვით, მაშინ წილის ჟანგბადის პოტენციალი ნაკლები გახდება ლითონში მყოფი ჟანგბადის პოტენციალზე. დარღვეული წონასწორობის აღსადგენად დაიწყება ჟანგბადის გადასვლა მაღალი პოტენციალის მქონე გარემოდან დაბალი პოტენციალის მქონე გარემოში ე.ი. ლითონიდან წიდაში. ეს გამოიწვევს ლითონში გახსნილი ჟანგბადის კონცენტრაციის შემცირებას ანუ მის განჟანგვას. ექსტრაქციული განჟანგვა სქემატურად შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, როგორც სამი რგოლისაგან შემდგარი პროცესი:

1. ლითონის მოცულობიდან ლითონისა და წილის გაყოფის ზედაპირისაკენ ჟანგბადის კონვექციური გადატანა;

2. ჟანგბადის გადასვლა ლითონისა და წილის გაყოფის საზღვარზე და მისი გარდაქმნა იონებად;

3. ჟანგბადისა და რკინის იონების კონვექციური გადატანა წიდა-ლითონის გაყოფის საზღვრიდან წილის მოცულობაში.

ასეთი მრავალსაფეხურიანი პროცესის ჯამური სინქარის მუდმივა შემდეგი ფორმულით გამოითვლება

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2 \cdot F} + \frac{1}{K_3}, \quad (2.197)$$

სადაც K_1 და K_3 არის ლითონსა და წიდაში ჟანგბადისა და რკინის გადატანის სინქარის კოეფიციენტები;

F – ლითონისა და წილის შეხების ხვედრითი ზედაპირი;

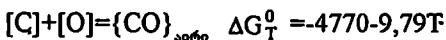
K_2 – ლითონისა და წილის გაყოფის საზღვარზე ჟანგბადისა და რკინის გადასვლის სინქარის კოეფიციენტი.

ფოლადსადნობ აგრეგატებში აბაზანის არევა ექსტრაქციული განჟანგვის პროცესში უმნიშვნელოა და მას იწვევს მხოლოდ აბაზანის ტემპერატურული ეფლის უთანაბრობა. ამის გამო, ჟანგ-

ბადის და რკინის მასათა გადატანის კოეფიციენტების სიდიდე მცირეა და თავისი რიგით უახლოვდება ამ ელემენტების დიფუზიის სიჩქარეს. მაგალითად, ჟანგბადისათვის დიფუზიის სიჩქარე არ აღემატება $10^{-4}-10^{-3}$ სმ²/წმ. (2.197) ფორმულაში შემავალი სამივე კოეფიციენტი დიდ მნიშვნელობას იძენს და ექსტაქციული განჯანგვის ჯამური სიჩქარის მუდმივა მცირე სიდიდის ხდება. ასეთ პირობებში განჯანგვაზე იხარჯება დიდი დრო. რაც იწვევს სადნობი აგრეგატის მოცდენას და მისი წარმადობის შემცირებას. ამით აიხსნება ის ფაქტი, რომ დიდი ტევალობის ღუმელებში ექსტრაქციულ განჯანგვას არ იყენებდნენ. მეტიც, იმის გამო, რომ განჯანგვის დაბალი სიჩქარე ამ ხერხის ნაკლია, დღეს მას უკვე არც ნაკლები ტევალობის ღუმელებში იყენებენ.

2.4.13. ვაკუუმური განჯანგვა

ფოლადის ვაკუუმური განჯანგვის საფუძველს წარმოადგენს ლითონში გახსნილ ჟანგბადსა და ნახშირბადს შორის ურთიერთქმედების რეაქცია



$$K_p = \frac{P_{CO}}{[C][O]} \quad (2.198)$$

სადაც P_{CO} არის ნახშირჟანგის წნევა, ატმ; $[C]$ და $[O]$ – ლითონში გახსნილი ნახშირბადისა და ჟანგბადის კონცენტრაციები (% მასის მიხედვით). ვინაიდან წონასწორობის დროს მოცემულ ტემპერატურაზე K_p -ს მნიშვნელობა მუდმივი სიდიდეა, შეგვიძლია (2.198) გამოსახულება წარმოვიდგინოთ სხვა ფორმულითაც

$$[C] \cdot [O] \cdot K_p = P_{CO}$$

საიდანაც

$$[O] = \frac{P_{CO}}{[C] \cdot K_p} \quad (2.199)$$

მიღებული დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ მოცემულ ტემპერატურაზე ნახშირბადის მუდმივი კონცენტრაციის შემთხვევაში ლითონში გახსნილი ჟანგბადის კონცენტრაცია ნახშირჟანგის წნევის პირდაპირპროპორციულია და მისი შემცირებისას მცირდება.

ვაჩერისა და ჰამილტონის მონაცემების საფუძველზე, 1600 °C-ზე (იმ შემთხვევაში, როდესაც ნახშირჟანგის წნევა ერთი ატმოსფეროს

ტოლია) ლითონში გახსნილი ნახშირბადისა და ჟანგბადის წონასწორული კონცენტრაციების ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა და უდრის

$$[C] \cdot [O] = K_p = 0,0025. \quad (2.200)$$

ზოგადად, (2.199) დამოკიდებულების გათვალისწინებით, აკვირდება

$$[O] = \frac{0,0025}{[C]} P_{CO}. \quad (2.201)$$

თუ ნახშირჟანგის წნევას გამოვსახავთ ვერცხლის წყლის სვეტის სიმაღლით (მმ Hg)^{*}, მაშინ

$$[O] = \frac{0,0025}{[C]} \cdot \frac{P_{CO}}{760} = \frac{3,3 \cdot 10^{-6}}{[C]} \cdot P_{CO}. \quad (2.202)$$

(2.202) დამოკიდებულება გამოყვანილია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც ნახშირჟანგის წნევა 1 ატმ ($1,01325 \cdot 10^5$ პა) ანუ 760 მმ Hg ტოლია.

ინტერესს იწვევს (2.202) დამოკიდებულების სიზუსტე უფრო დაბალ წნევაზე და ასეთ პირობებში მისი გამოყენების შესაძლებლობა. ამ მიზნით ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, რომ დაბალ წნევაზე ($P_{CO} = 10^{-2} - 10^{-3}$ მმ Hg) K_p საგრძნობლად განსხვავდება ვაჩერისა და ჰამილტონის მიერ მიღებული სიდიდისაგან. ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს რიგი მიზეზებით: ნახშირბადისა და ჟანგბადის დაბალი კონცენტრაციების განსაზღვრის ნაკლები სიზუსტით, ნახშირჟანგის ბუშტულის ჩასახვის გაძნელებით, გაჯერების ხარისხის შემცირებითა და სხვა გათვალისწინებელი კინეტიკური ფაქტორებით. მიუხედავად აღნიშნულისა, შეიძლება დაუშვათ, რომ ნახშირჟანგის დაბალი წნევის შემთხვევაშიც მისაღებია ვაჩერისა და ჰამილტონის მიერ დადგენილი მუდმივას რიცხვითი მნიშვნელობა და შეიძლება გამოვიყენოთ (2.202) ფორმულა.

(2.202) ფორმულიდან გამომდინარე, ნახშირბადის ნარჩენ კონცენტრაციას 0,1 %, როდესაც $P_{CO} = 0,01$ მგპა (0,1 ატმ) 1600 °C-ზე, შეესაბამება ჟანგბადის წონასწორული კონცენტრაცია – 0,002 %. ამ პირობებში ნახშირბადს ტიტანზე მეტი განმჟანგელებუნარიანობა აქვს. უფრო დაბალ წნევაზე, როდესაც $P_{CO} = 0,0001$ მგპა (0,001 ატმ), ნახშირბადის განმჟანგელებუნარიანობა ალუმინის და ცირკონიუმისაზე მეტიც კი ხდება. ეს შედეგები სწორია იდეალური პირობები-

* რედაქტორისაგან: ამჟამად მოქმედმა აღნიშნვამ „მმ Hg“ შეცვალა ადრინდელი „მმ. ვცხ. წყ. სვ.“.

სათვის, როდესაც ლითონი არ იმყოფება შეხებაში რომელიმე ოქსიდურ ფაზასთან, მაგალითად, ამონაგთან. ასეთი პირობები გვაქვს ვაკუუმურ-რკალური, ელექტრონულ-სხივური და პლაზმურ-რკალური დნობის დროს. ფოლადის დნობის ჩვეულებრივ პირობებში, როდესაც ლითონი შეხებაში იმყოფება სადნობი აგრეგატის (ვაკუუმური ინდუქციური ღუმელი) ან ციციხის ამონაგთან, გარდა ამისა, როდესაც საწარმოო პირობებში თითქმის შეუძლებელია მაღალი ვაკუუმის მიღწევა, ნახშირბადი თეორიულად გათვლილთა შედარებით, ბევრად უფრო ნაკლებ განმუხანგველუნარიანობას ამჟღავნებს. მიუხედავად ამისა, ვაკუუმის პირობებში ნახშირბადი მაინც გამოირჩევა საკმაოდ მაღალი განმუხანგველუნარიანობით და სწორედ ამას ემყარება განმუხანგვის აღნიშნული ხერხი.

2.4.14 ფოლადის ლეგირება

ლეგირების დროს რკინაში შეჰყავთ ისეთი ელემენტი ან ელემენტები, რომლებიც მას აძლევენ ჩვენთვის სასურველ ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს. თანამედროვე ფოლადის მეტალურგიაში მალეგირებულ მისართებად გამოიყენება მენდელეევის პერიოდული სისტემის როგორც ლითონური, ასევე არალითონური ელემენტები.

ელემენტები Si, Mn, S, P, N, რომლებიც გარკვეული რაოდენობითაა ყველა ტიპის ფოლადში, შეიძლება მიეკუთვნოს მალეგირებელი კომპონენტების რიცხვს იმ შემთხვევაში, თუ მათი კონცენტრაცია რიგითი მარკის ფოლადისათვის დაშვებულ ნორმებს აღემატება.

ხშირ შემთხვევაში მალეგირებელი ელემენტი იმავედროულად ფოლადის განმუხანგველადაც გამოიყენება.

ფოლადის თვისებებზე ზემოქმედების მიხედვით, მალეგირებელი ელემენტები ორ დიდ ჯგუფად იყოფა:

I ჯგუფი აფართოებს მყარი ხსნარების უარეს (მდგომარეობის დიაგრამაზე), მათ მიეკუთვნებათ ისეთი ელემენტები, რომლებიც განუსაზღვრელი ხსნადობით ხასიათდებიან რკინაში. ასეთებია: მანგანუმი, ნიკელი, კობალტი, სპილენძი, ნაწილობრივ – ნახშირბადი და აზოტი.

II ჯგუფი ამცირებს მყარი ხსნარების უარეს (მდგომარეობის დიაგრამაზე). მათ მიეკუთვნებათ ისეთი ელემენტები, რომლებიც რკინასთან წარმოქმნიან მთლიანად დახურულ უარეს. ასეთებია:

ალუმინი, სილიციუმი, ტიტანი, ფოსფორი, ვოლფრამი. ვანადიუმი, ქრომი, მოლიბდენი, ნიობიუმი, ცირკონიუმი, ცერიუმი.

იმისათვის რომ, ფოლადის გამოდნობისას შევამციროთ მალეგირებელი ელემენტების დანაკარგები, აუცილებელია ვიცოდეთ ჟანგბადთან მათი შეერთების უნარი რკინასთან შედარებით. ამის მიხედვით, მალეგირებელი ელემენტები ორ ჯგუფად იყოფა:

I ჯგუფს მიეკუთვნება ელემენტები, რომელთა სწრაფვა ჟანგბადთან ნაკლებია, ვიდრე რკინისა. ასეთებია: ნიკელი, მოლიბდენი, კობალტი, სპილენძი. ისინი დნობისა და ჩამოსხმის პროცესში არ იჟანგებიან და მათი შეტანა ლითონში დნობის ნებისმიერ მომენტში შეიძლება.

II ჯგუფს მიეკუთვნება ელემენტები, რომლებთაც აქვთ ჟანგბადთან სწრაფვის მეტი უნარი, ვიდრე რკინას. ასეთ ელემენტებს განეკუთვნება: მანგანუმი, სილიციუმი, ალუმინი, ტიტანი, ვანადიუმი, ქრომი და სხვა. დანაკარგების შემცირების მიზნით, ეს ელემენტები ფოლადში შეჰყავთ დნობის ბოლოს, განუანგვის შემდეგ.

მალეგირებელი ელემენტები ფოლადში, უმეტეს შემთხვევაში, ფეროშენადნობების სახით შეაქვთ. ეს განპირობებულია რამდენიმე გარემოებით, სახელდობრ: ზოგი ელემენტის მიღება ფეროშენადნობების სახით ბევრად უფრო ადვილია და იაფი ჯდება. გარდა ამისა, შენადნობების სახით მათი გამოყენება ამცირებს შენადნობის დნობის ტემპერატურას, რაც ხელს უწყობს ფოლადის მიერ მათ სწრაფ ათვისებას.

ზოგიერთ შემთხვევაში ლეგირებისათვის იყენებენ ეგზოთერმულ ბრიკეტებს, რომელთა შედგენილობაში არის ამა თუ იმ ელემენტის ჟანგეულები. მალეგირებელი და დამჟანგავეი ფხვნილები. გამდნარ ფოლადში მოხვედრისას ბრიკეტში იწყება ალდგენითი პროცესი. ნაწილი ელემენტებისა იჟანგება და გადადის წიდაში, ნაწილი კი ალდგება და ხდება ფოლადის, ეგრეთწოდებული პირდაპირი ლეგირება.

აირეპი და არალითონური ჩანართები ლითონში

2.5.1. აირების ხსნადობა ლითონში

ბუნებაში არსებული ყველა ლითონი გარკვეული რაოდენობით შეიცავს აირებს – წყალბადს (H_2), აზოტს (N_2) და ჟანგბადს (O_2). როდესაც რკინაში და მის შენადნობში გახსნილ აირებზე საუბრობენ, როგორც წესი, გულისხმობენ წყალბადსა და აზოტს. ვინაიდან ჟანგბადის ხსნადობა ხასიათდება სხვა კანონზომიერებით და ლითონში გახსნილი ჟანგბადი წონასწორობაში იმყოფება არა აიროვან ფაზასთან, როგორც ამას ადგილი აქვს წყალბადისა და აზოტის შემთხვევაში, არამედ მყარ ან თხევად მდგომარეობაში მყოფ წიღურ ნადნობებთან.

აზოტისა და წყალბადის ხსნადობა რკინაში ექვემდებარება ზოგად კანონს, ე.წ. კვადრატული ფესვის კანონს, რომელიც პირველად გერმანელმა მეცნიერმა სივერტსმა დაადგინა და მისი სახელითაა ცნობილი: თხევად ლითონში აირის წონასწორული შემცველობა აირად ფაზაში მისი პარციალური წნევის კვადრატული ფესვის პროპორციულია და გამოისახება განტოლებებით:

$$\frac{1}{2} N_2 = [N]; \quad [N] = K_N \sqrt{P_{N_2}},$$

$$\frac{1}{2} H_2 = [H]; \quad [H] = K_H \sqrt{P_{H_2}},$$

სადაც $[N]$ და $[H]$ – აზოტისა და წყალბადის შემცველობა ლითონში, %, $K_{N,H}$ – პროპორციულობის კოეფიციენტი (წონასწორობის მუდმივა), რომელიც რიცხვობრივად თხევად ლითონში აირის ხსნადობის ტოლია მოცემულ ტემპერატურაზე, როდესაც აირის პარციალური წნევა ($P_{N,H}$)=1,0 ატმ.

აღნიშნული დამოკიდებულება მიგვანიშნებს იმაზე, რომ როგორც აზოტი, ასევე წყალბადი თხევად რკინაში იხსნება არა მოლეკულის, არამედ ატომის (იონის) სახით. 2.9 ცხრილში მოყვანილია აზოტისა და წყალბადის თხევად რკინაში ხსნადობის თერმოდინამიკური პარამეტრები. როგორც ცხრილიდან ჩანს, ატომური აზოტის და წყალბადის ხსნადობა რკინაში (მე-2 და მე-5 რეაქციები ცხრილში) ხასიათდება სითბოს გამოყოფით, მაგრამ თვით ამ აირების მოლეკულების დაშლაზე (პირველი და მე-4

რეაქცია ცხრილში) იხარჯება იმდენი სითბო, რომ ჯამური რეაქციები (მე-3 და მე-6 რეაქცია ცხრილში) ხასიათდება სითბოს დანაკარგით. საბოლოო ჯამში ამ აირების გახსნა თხევად რკინაში სითბოს შთანთქმით მიმდინარეობს და ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მათი ხსნადობაც იზრდება.

ცხრილი 2.9

აზოტისა და წყალბადის რკინაში ხსნადობის თერმოდინამიკური პარამეტრები (მონაცემები აღებულია ო. კუბაშევსკის ცნობარიდან)

N ^o	რეაქცია	$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$, ჯ/მოლი	ΔG^0 , ჯ/მოლი	lg K	K_{1873}	K_{2073}	$\frac{K_{2073}}{K_{1873}}$
1	$\{N_2\} = 2[N]$	361500-65.27T	239250	$\lg \frac{P_1}{P_2} = -\frac{18880}{T} + 3.41$	$2.10 \cdot 10^{-7}$	$2.10 \cdot 10^{-7}$	9.39
2	$\{N\} = [N]$	-343690+81.93T	-190230	$\lg \frac{a_N}{P_1} = -\frac{17950}{T} - 4.28$	$2.01 \cdot 10^5$	$2.39 \cdot 10^4$	0.12
3	$\{N_2\} = 2[N]$	17810+16.66T	49010	$\lg \frac{a_N}{P_2} = -\frac{930}{T} - 0.87$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	$4.8 \cdot 10^{-2}$	1.12
4	$\{H_2\} = 2[H]$	222170-58.16T	113240	$\lg \frac{P_1}{P_2} = -\frac{1160}{T} + 3.4$	$7.03 \cdot 10^{-4}$	$2.78 \cdot 10^{-3}$	3.96
5	$\{H\} = [H]$	-185790+88.35T	-20310	$\lg \frac{a_H}{P_2} = -\frac{9700}{T} - 4.61$	3.68	1.17	0.32
6	$\{H_2\} = 2[H]$	36380+30.19T	92930	$\lg \frac{a_H}{P_1} = -\frac{1900}{T} - 1.5$	$2.56 \cdot 10^{-3}$	$3.09 \cdot 10^{-3}$	1.25

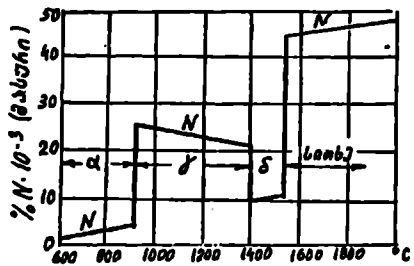
ტემპერატურის გაველენა რკინაში აზოტისა და წყალბადის ხსნადობაზე მოყვანილია სურათებზე 2.10 და 2.11.

როგორც სურათებიდან ჩანს, ტემპერატურის ზრდასთან ერთად აზოტისა და წყალბადის ხსნადობა თხევად რკინაში მონოტონურად იზრდება. მათი ხსნადობა მაქსიმუმს აღწევს 2400 °C-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე ამ აირების ხსნადობას ხელს უშლის რკინის აორთქლება, რაც ამცირებს აზოტისა და წყალბადის პარციალურ წნევას ლითონის ზედაპირის მახლობლად.

აღსანიშნავია ისიც, რომ თხევადი რკინის გამყარებისა (დაკრისტალების) და შემდგომი ალოტროპიული გარდაქმნების მომენტებში აირების ხსნადობა ამ ლითონში ნახტომისებურად იცვლება. ამასთან მაღალტემპერატურულ δ-Fe მოდიფიკაციაში აირების ხსნადობა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე დაბალტემპერატურულ γ-Fe მოდიფიკაციაში. γ-Fe-დან α-Fe-ში გადასვლისას აირების ხსნადობა ისევ მკვეთრად მცირდება და ოთახის ტემპერატურაზე α-Fe-ში აირების ხსნადობა პრაქტიკულად ნულის ტოლია.

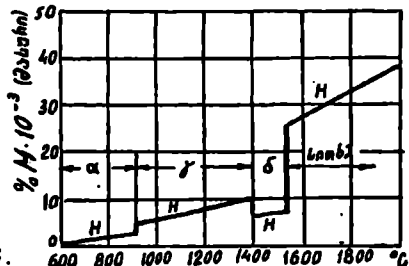
აირის გადასვლა აიროვანი ფაზიდან თხევად ლითონში მრავალსაფეხურიანი პროცესია და შეიძლება დაიყოს შემდეგ ეტაპებად:

1. აირის მოლეკულების კონცენტრირება აირის მოცულობიდან ლითონის ზედაპირთან. რაც გამოწვეულია ლითონის ატომების (იონების) და აირის მოლეკულების ურთიერთქმედებით;



სურ. 2.10 ტემპერატურის გაელენა აზოტის ხსნადობაზე რკინაში

($P_{N_2} = 1$ ატმ)



სურ. 2.11 ტემპერატურის გაელენა წყალბადის ხსნადობაზე რკინაში

($P_{H_2} = 1$ ატმ)

2. აირის მოლეკულების დაშლა იონებად (ატომებად) და მათი ადსორბირება ლითონის ზედაპირზე;

3. აირის იონების (ატომების) გადაადგილება (დიფუზია) ლითონის ზედაპირული შრიდან მთელ მოცულობაში.

აირის ლითონში გახსნის პროცესი გამარტივებულად შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი განტოლებით

$$\frac{1}{K_{\Sigma}} = \frac{1}{\frac{1}{D_1} + \frac{1}{K_{\Sigma}} + \frac{1}{D_2}}, \quad (2.203)$$

სადაც K_{Σ} აირის ლითონში გადასვლის ჯამური კოეფიციენტი; D_1 და D_2 მასათა გადაადგილების კოეფიციენტებია აირის მოლეკულების აიროვან ფაზაში (D_1) და აირის იონებისა ლითონურ ფაზაში (D_2); .

K_{Σ} ადსორბციულ-კინეტიკური პროცესის კოეფიციენტი.

აირების ლითონში გახსნის რაოდენობრივი დახასიათებისათვის შემოღებულია ხსნადობის ცნება. ხსნადობა წარმოადგენს ლითონის ერთეულ მასაში გახსნილი აირის მოცულობით ან წონით რაოდენობას, როდესაც ამ აირის წნევაა 1 ატმ.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, აირის გახსნა ლითონში ხასიათდება სისტემის იზობარულ-იზოთერმული ჯამური პოტენციალის ცვლილებით.

აირების მოლეკულათა დისოციაციისათვის ენთალპიის ცვლილება ყოველთვის დადებითი სიდიდეა ე.ი. $\Delta H_{\text{გახ.}} > 0$. ლითონში აირის იონის (ატომის) ხსნარის ან ქიმიური ნაერთის წარმოქმნის პროცესში კი ენთალპიის ცვლილება უარყოფითია ე.ი. $\Delta H_{\text{გახ.}} < 0$. ამის გამო, $\Sigma \Delta H$ -ის ნიშანი დამოკიდებულია $\Delta H_{\text{გახ.}}$ და $\Delta H_{\text{გახ.}}$.

სიდიდეთა აბსოლუტურ მნიშვნელობებზე. ტემპერატურის გაველენა ხსნადობაზე გამოისახება ვანტ-ჰოფის განტოლებით.

$$\frac{d \ln S_a}{dT} = \frac{\Sigma \Delta H}{2RT^2}, \quad (2.204)$$

სადაც S_a ლითონში გახსნილი აირის რაოდენობაა, როდესაც $P_a=1$ ატ. ΔH – ენტალპიის ჯამური ცვლილება აირის გახსნის დროს 1 მოლ აირზე გათვლით;

R – აირების უნივერსალური მუდმივა;

T – აბსოლუტური ტემპერატურა.

აირებზე ზოგადი დებულებების ჩამოყალიბების შემდეგ, განვიხილოთ აზოტისა და წყალბადის ხსნადობა რკინაში და ფოლადში ცალ-ცალკე.

აზოტი. დადგენილია, რომ აზოტი თხევად რკინაში იხსნება N^{α} ან N^{β} იონების სახით. 1600 °C ტემპერატურისა და $P_a=1$ ატმ წნევის დროს რკინაში იხსნება 0,043 % აზოტი. თხევად რკინაში რკინის ნიტრიდების (Fe_3N ან Fe_4N) წარმოქმნა არ ხდება მაშინაც კი, როდესაც $P_{N_2} > 1$ ატმ. ეს ნიტრიდები წარმოიქმნება მხოლოდ რკინის გამყარების დროს აუსტენიტის არსებობის ტემპერატურულ ინტერვალში. ატმოსფეროსთან (ჰაერთან) გამდნარი რკინის კონტაქტის დროს, როდესაც აზოტის პარციალური წნევა $P_{N_2}=0,78$ ატმ., აზოტის ხსნადობაა 0,038 %. საწარმოო დნობების დროს ეს სიდიდე უფრო ნაკლებია და არ აღემატება 0,020 %-ს.

პრაქტიკისათვის ძალზე ღივი მნიშვნელობა აქვს რკინაში მყოფი სხვადასხვა ელემენტის (კომპონენტის) გაველენას აზოტის ხსნადობაზე. თუ რკინაში გახსნილ აზოტს და ელემენტს შორის ურთიერთქმედების ენერჯია აღემატება რკინისა და აზოტის ან რკინისა და ელემენტს შორის ურთიერთქმედების ენერჯიას, მაშინ ელემენტი ზრდის აზოტის ხსნადობას რკინაში. საწინააღმდეგო შემთხვევაში, აზოტის ხსნადობა რკინაში მცირდება. ზოგიერთი ელემენტის გაველენა რკინაში აზოტის ხსნადობაზე მოყვანილია სურათზე 2.12.

რკინაში აზოტის ხსნადობაზე მოქმედების მხრივ ელემენტები შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად:

1. ნიტრიდთა წარმოქმნელები (Al, Ti, Cr, Mn, Mo, Nb, V), რომლებიც ზრდიან აზოტის ხსნადობას რკინაში;

2. ელემენტები, რომლებიც არ ცვლიან რკინაში აზოტის ხსნადობას (Cu, O, P, S).

3. ელემენტები, რომლებიც ამცირებენ რკინაში აზოტის ხსნადობას (C, Si, Ni, W).

როგორც ვხედავთ, მალეგობრივი ელემენტების უმრავლესობა ზრდის რკინაში აზოტის ხსნადობას. ამით აისხნება მაღალტემპურ ფოლადებში აზოტის მეტი რაოდენობა სუფთა რკინასთან შედარებით.

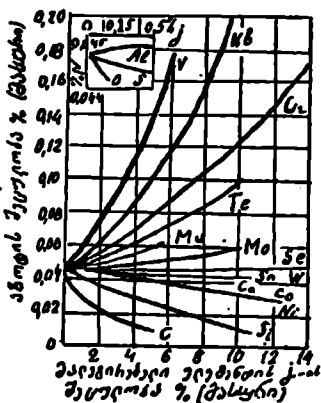
გარდა ზემოაღნიშნულისა, ფოლადში აზოტის შემცველობა დიდად არის დამოკიდებული გამოდნობის პროცესის ტიპზე, დნობის პროცესის მიხედვით, ფოლადში გახსნილი აზოტის წილი (გამოსახული მასური %ით) შემდეგ ზღვრებში მერყეობს:

- თომასის 0,015—0,02,
- ბესემერის 0,01—0,015,
- ელექტრორკალური 0,005—0,010,
- მარტენის 0,0030—0,0070,
- ჟანგბად-კონვერტერული 0,002—0,0035.

ეს განსხვავება აისხნება დნობის სხვადასხვა პროცესში აზოტის შთანთქმისა და გამოყოფის არაერთგვაროვანი პირობებით. მაგალითად, თომასის ან ბესემერის კონვერტერულ პროცესში დნობის დროს ლითონი უშუალო ინტენსიურ კონტაქტშია პაერსა და აირად ფაზასთან, რომლებშიც მაღალია აზოტის პარციალური წნევა ($P_{N_2}=0.65-0.78$). ამის გამო, ამ აირს ამ პროცესების მსვლელობისას ინტენსიურად შთანთქავს თხევადი ლითონი.

მიუხედავად ამისა, აზოტის შთანთქმა გამოდნობის ყველა პროცესში ვერ აღწევს წონასწორულ მდგომარეობას — მისი შემცველობა ლითონში, ჩვეულებრივ, ორჯერ (და მეტჯერ) ნაკლებია წონასწორულთან შედარებით.

მარტენის პროცესში აზოტის შთანთქმის პირობა არახელსაყრელია, რადგანაც ლითონი აირული ფაზისაგან წილის გარკვეული ფენითაა გამოყოფილი და დაცული. გარდა აღნიშნულისა, აბაზანის დულილის პროცესში აზოტი CO-ს ბუშტულებს გადააქვს ლითონიდან აირულ ფაზაში. ანალოგიური პირობაა ელექტრორკალურ ღუმელშიც, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ელექტრული რკალის მაღალი ტემპერატურა ააქტიურებს აზოტის მოქმედებას — აადვილებს მისი მოლეკულების დაშლას იონებად, რაც რამდენადმე ზრდის ამ აირის შემცველობას ლითონში.



სურ. 2.12 ელემენტების გაველება აზოტის ხსნადობაზე რკინაში ($P_{N_2}=1$ ატმ; $T=1600$ °C)

რკინაში გახსნილი აზოტი გამოირჩევა ზედაპირული აქტიურობით და ამიტომ ის ამცირებს თხევადი რკინის ზედაპირულ დაჭიმულობას – σ_{Fe-N} (ნ/მ). 1550 °C ტემპერატურაზე ის შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი გამოსახულების მეშვეობით

$$\sigma_{Fe-N} = 1,860 - 1,050 \cdot \lg(1 - 149N_N), \quad (2.205)$$

სადაც N_N აზოტის მოლური წილია.

თხევად რკინაში გახსნილი აზოტი ზრდის მის სიბლანტეს. ასე მაგალითად, 1600 °C-ზე აზოტის შემცველობის მატება 0,005-დან 0,030 %-მდე ზრდის თხევადი რკინის სიბლანტეს $7,8 \cdot 10^7$ -დან $9,2 \cdot 10^7$ მ/წ-მდე.

წყალბადი. ვინაიდან წყალბადის ატომს გარსზე მხოლოდ ერთი ელექტრონი აქვს, იონად გადაქცევის შემთხვევაში ის თხევად რკინაში გადადის როგორც პროტონი. პროტონს არ აქვს ელექტრონული გარსი, ამიტომ იგი ადვილად შედის რკინის იონთან კავშირში და ქმნის ჩანერგვის ხსნარს. თხევად რკინაში 1600 °C ტემპერატურისა და $P_H = 1$ ატმ. წნევის დროს წყალბადის წონასწორული რაოდენობაა 0,00256 % ანუ 28,9 სმ³/100გ ლითონში.

აზოტის მსგავსად რკინაში წყალბადის ხსნადობაზე დიდ გავლენას ახდენს მასში მალეგირებული ელემენტების არსებობა. ისინი შეიძლება დაეყოს სამ ჯგუფად.

1. პიდრიდწარმოქმნელი ელემენტები (Ti, Nb, Zr, V, Ce, La). რომლებიც ზრდიან წყალბადის ხსნადობას რკინაში. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია აქ იშვიათ მიწათა ლითონების გავლენა, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ფოლადის წარმოების პირობებში ლითონში პიდრიდები არ წარმოიქმნება;

2. ელემენტები, რომლებიც არ მოქმედებენ რკინაში წყალბადის ხსნადობაზე (Mn, Ni, Co, Cr, Mo, Cu).

3. ელემენტები, რომლებიც ამცირებენ წყალბადის ხსნადობას რკინაში (O, C, Si, Al, P). ეს ელემენტები წარმოქმნის რკინის ატომებთან დაჯგუფებებს ატომებს შორის ძლიერი კავშირით, რის შედეგადაც მცირდება რკინის აქტიურობა წყალბადთან. განსაკუთრებით ძლიერია ჟანგბადის ზეგავლენა რკინაში წყალბადის ხსნადობაზე.

წყალბადი აზოტის მსგავსად გამოირჩევა ზედაპირული აქტიურობით და ამიტომ ამცირებს თხევადი რკინის ზედაპირულ დაჭიმულობას σ_{Fe-H}

2.5.2. ფოლადში აირების შემოსვლის წყაროები და აირების მოშორება

ფოლადსადნობ აბაზანაში აირები სხვადასხვა გზებით შედის. ისინი შეაქვს ლითონურ და არალითონურ საკაზმე მასალებს, სათბობს, გარემომცველ ატმოსფეროს, განმუხანგველებსა და მალეგირებელ დანამატებს. ლითონური საკაზმე მასალები საკმაო რაოდენობით შეიცავს აირებს (ცხრ. 2.10) და დნობის დროს შეაქვს ისინი აბაზანაში.

წყალბადის გარკვეული რაოდენობა ფოლადსადნობ აბაზანაში შეაქვს ფხვიერ წიდაწარმომქმნელ საკაზმე მასალებს – რკინის მადანს, ბოქსიტს და კირს. რკინის მადანი და ბოქსიტი შეიცავს 10–18 % ტენს, ხოლო კირი, რომელიც ადვილად განიცდის ჰიდრატაციას – 10–15 %-ს. ეს სამივე მასალა ქმნის ლითონის წყალბადით გამდიდრების წყაროს, ამიტომ ხარისხოვანი ფოლადის გამოდნობისას, ღუმელში ჩატვირთვის წინ მადანს და კირს წინასწარ ახურებენ, ხოლო ბოქსიტის ნაცვლად იყენებენ შამოტის აგურის ნამტვრევებს.

აირების გარკვეული რაოდენობა ფოლადსადნობ აბაზანაში შეაქვს სადნობის აგრეგატის ატმოსფეროს. ალქმედ ღუმელებში დნობის პროცესის ჩასატარებლად ყოველთვის გამოიყენება სათბობი (შერეული აირი, ბუნებრივი აირი, მაზუთი) და ჰაერი, ხოლო მაზუთის გასაფრქვევად – წყლის ორთქლი. სათბობის წვის შედეგად ასევე წარმოიქმნება წყლის ორთქლი, რომლის პარციალური წნევა მარტენის ღუმელის ატმოსფეროში შეადგენს 10–20 კპა (0,1–0,2 ატმ), ხოლო ჰაერის მიერ შეტანილი აზოტის პარციალური წნევაა 66–76 კპა (0,65–0,76 ატმ). ბესემერისა და თომასის პროცესებში კი, შებერვისათვის გამოყენებული ჰაერის ტენიანობის მიხედვით. წყლის ორთქლის პარციალური წნევაა 1,6–3 კპა (0,016–0,03 ატმ), ხოლო აზოტისა – 76–96 კპა (0,76–0,96 ატმ).

განმუხანგველებს და მალეგირებელ დანამატებს წყალბადისა და აზოტის გარკვეული რაოდენობა შეაქვს აბაზანაში. მართალია, ფეროშენადნობები საკმაო რაოდენობით შეიცავს აირებს (აზოტი – 0,001–0,05 %, წყალბადი 2–50 სმ³/100 გ), მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ, რომ მათი ხარჯი არ არის დიდი, მაშინ არც მათ მიერ შეტანილი აირების რაოდენობა იქნება დიდი, თუმცა აირების შემცირებისათვის უმჯობესია ფეროშენადნობების წინასწარი გახურება 400–600 °C ფარგლებში.

საერთოდ, ფოლადსადნობ აბაზანაში აირების რაოდენობის ცვლილება წარმოადგენს ორი ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართუ-

აირების შემცველობა ლითონურ საკაზმე მასალებში, ფეროშენადნობებსა და მალევირებელ დანამატებში

დასახელება	წყალბადის შემცველობა		აზოტის შემცველობა
	სმ ³ /100გ	%	%
გადასამუშავებელი თუჯი (ქურაში)	11.2-28 2-5 2.5-6	0.0010-0.0025 0.00018-0.00044 0.0003-0.00065	0.005 0.005-0.012% 0.002-0.006
პაერზე ნადები თუჯის შოთი	10-15	0.00089-0.00134	—
ქრომით ლეგირებული გადასამუშავებელი თუჯი	—	—	0.005-0.009
ჯართი	4.5-9.0	0.0004-0.0008	0.003-0.005
მდულარა ფოლადის სოდის ჩამონატრები	2-3	0.00018-0.00027	—
მშვიდი და ლეგირებული ფოლადის სოდის ჩამონატრები	8-10	0.00071-0.00089	—
დაფანგული წერილი ჯართი 0,1 მმ სისქის ქანგით		0.122	—
ნიკელი:			
კათოდური (შენახვის შემდეგ)	2-8	0.00018-0.00071	—
თბური	5-8	0.00044-0.00071	0.0025
ფეროსილიციუმი:			
90 %-იანი	—	—	0.001-0.005
75 %-იანი	8-15 30-50	0.00071-0.00134 0.00267-0.00445	0.001-0.005 —
ფეროქრომი:			
მცირენახშირბადიანი (C<0,1 %)	3-12	0.00027-0.00107	0.02-0.05
საშუალო ნახშირბადიანი (C=1 %)	—	0.00027-0.00107	0.03-0.05
ნახშირბადიანი (C=4-6 %)	5-12	0.00044-0.00107	0.004-0.012
ქრომი ალუმოთერმული (გვარჯილის გამოყენებით მიღებული)	—	—	0.16-0.25
სილიკოქრომი	2-10	0.00018-0.00089	—
ფერომანგანუმი:			
ბრძმედის (75-80 %)	20-40	0.00178-0.00356	0.02-0.05
მცირენახშირბადიანი სილიკოთერმული	2,0-20	0.00018-0.00178	0.01-0.06
მანგანუმი:			
ელექტროლიტური	100-150	0,0089-0,01335	0,01
ელექტროთერმული	40	0,00356	0,03-0,05
ალუმოთერმული	30	0,00267	0,08
სილიკომანგანუმი	30-45 20-45	0,00267-0,00401 0,00178-0,00401	0,02-0,04 —
ფეროტიტანი 70 %-იანი	30-40	0.00267-0.00356	0.6-მდე
ფეროტიტანი Ti-1	55-78	0.00490-0.00694	0.036-0.055

ყუროსილობიუმში: პიროქლორული კონცენტრაციიდან ნიობიუმის სუთუნანგიდან	20-40 -	0,00178-0,00356 -	0,5-მდე 0,06-0,09
ყუროვანადიუმში: 40-55 %-იანი	20-40 -	0,00178-0,00356 -	0,01-0,02 0,06-მდე
80 %-იანი	30-90 -	0,00267-0,00801 -	0,01-0,08 0,2-მდე
სილიკოკალციუმი (25-33 % Cი)	20-100	0,00178-0,00890	0,01-0,03
ფეროფლურამი: ელექტროთერმული	1-4 7,8-12,5	0,00009-0,00036 0,00069-0,00111	0,016-0,021 0,016-0,021
ალუმოთერმული	12,9-15,9	0,00115-0,00142	0,028-0,036
ყუროსმილიბდენი	5-20 20,5-33,0	0,00044-0,00178 0,00182-0,00294	- 0,010-0,027
ალუმინი პირველადი	1-2	0,00009-0,00018	≤0,001

ლებით მიმდინარე პროცესთა ჯამს. ერთი მხრივ, ოხევედ ლითონში აირები შედის ღუმელის ატმოსფეროსა და სხვადასხვა დანამატებიდან, მეორე მხრივ, აბაზანის დუღილის შედეგად ხდება ლითონში მყოფი აირების გამოტანა. იმისდა მიხედვით, თუ ამ პროცესთაგან რომელი სჭარბობს, აირების რაოდენობა ლითონში ან იზრდება, ან მცირდება.

ყველაზე მეტი რაოდენობით ფოლადსადნობ აბაზანაში აირები შეაქვს საკაზმე მასალებს, მაგრამ გადნობის დროს აბაზანის აქტიური არევის შედეგად ხდება ამ აირების ძირითადი ნაწილის მოშორება. დადგენილია, რომ ნახშირბადის ინტენსიური ამოწვისას საგრძნობლად მცირდება წყალბადისა და აზოტის რაოდენობა ფოლადსადნობ აბაზანაში. ეს იმით აიხსნება, რომ ნახშირუანგის (CO) ბუშტულებში წყალბადისა და აზოტის პარციალური წნევა ჩუქს უახლოვდება. ამის გამო, აბაზანაში გადაადგილებისას ბუშტულას გარემომცველი ლითონიდან მასათა განაწილების კანონის თანახმად ხდება ამ აირების გადასვლა ბუშტულაში და მისი საშუალებით ლითონიდან გატანა. როდესაც აბაზანის დუღილის ინტენსიუობა მცირდება, მაშინ ნაკლები რაოდენობით წარმოიქმნება ნახშირუანგის ბუშტულები და მათ მიერ გამოტანილი აირების რაოდენობაც კლებულობს. ამას ემატება ისიც, რომ ღუმელის ატმოსფერიდან უფრო მეტი აირები შედის და საბოლოო ჯამში ლითონი მდიდრდება წყალბადითა და აზოტით. განსაკუთრებით დიდია ლითონის აირებით გაჯერება განუანგის პერიოდში, როდესაც ნახშირბადის ამოწვა აღარ ხდება და აბაზანა დაწყნარებულია. ამ დროს ღუმელის ატმოსფერიდან ლითონში

უხვად შედის აირები. ამასთან ერთად, როგორც უკვე იყო აღნიშნული, სოკოვითი განმუანგველი და მალეგარებელი ელემენტი ზრდის რკინაში აირების ხსნადობას და ფოლადი საგრძობლად მდიდრდება წყალბადითა და აზოტით. სწორედ ამით ახსნივა ფეროშენადნობების განსაკუთრებული გაჯლეხა ფოლადში აირების შემცველობაზე. მართალია, ფოლადსადნობ აგრეგატებში ეს პროცესი მიმდინარეობს წიფით დაფარულ ლითონში და წიდა გარკვეულ წილად იცავს კიდეეაც მას აირებისაგან. მაგრამ თუთონ წიდებიც არ არის აირგაუმტარები. ფუძე და მუაეა წიდებში წყალბადი იხსნება კიდროქსილის (OH⁻) იონების სახით. ფუძე წიდებში წყალბადის ხსნადობა უფრო მეტია. ვიდრე მუაეე წიდებში. წიდებში გარკვეული რაოდენობით იხსნება აგრეთვე აზოტიც. ფუძე წიდებში აზოტის რაოდენობა იცვლება 0,002—0,008 %-ის ფარგლებში. მუაეე წიდებში კი — 0,001—0,003 %. ფუძე წიდები უკეთესად ატარებს წყალბადს. ვიდრე აზოტს. ამიტომ, ღუმელის ატმოსფეროდან აზოტზე მეტად წყალბადი შედის ლითონში წიდის გაჯლთით. საერთოდ, წიდებში აირების გადაადგილების სინქარე დამოკიდებულია წიდის სიბლანტეზე. ფუძე წიდებთან შედარებით. უფრო ბლანტი მუაეე წიდები ნაკლებად გაატარებენ აირებს ღუმელის ატმოსფეროდან ლითონისაკენ. სწორედ ეს წარმოადგენს იმის ერთ-ერთ მიზეზს, რომ მუაეე მარტენის ღუმელში გამოდნობილი ფოლადი უფრო სუფთაა აირების მხრივ. ფუძე მარტენის ღუმელში გამოდნობილ ფოლადთან შედარებით.

2.5.3. არალითონური ჩანართების წარმოქმნა და ფოლადიდან მოშორება

ლითონების მიკროსკოპით გასინჯვისას შეიმჩნევა არალითონური ფაზები. რომლებსაც არალითონურ ჩანართებს უწოდებენ. ძალზე დიდია მათი გაჯლეხა ლითონის ხარისხსა და თვისებებზე. რის გამოც, გამოდნობილი ლითონი ხშირად უვარვისი ხდება დანიშნულებით გამოყენებისათვის. ამიტომ, არალითონური ჩანართების ბუნების და მათი წარმოქმნის შესწავლა და, აქედან გამომდინარე, მათი ლითონური ფაზიდან მოშორება ფოლადსადნობი წარმოების მეტად მნიშვნელოვანი ამოცანაა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ვერც ერთი სახის სამრეწველო დნობა ვერ უზრუნველყოფს სხმულის მიღებას არალითონური ჩანართების გარეშე.

ლითონში მოხვედრილი არალითონური ჩანართები წარმოშობის მიხედვით ორ ძირითად ჯგუფად იყოფა:

ეკსოგენური, რომლებიც ხვდება ლითონში მექანიკური გზით როგორც წიდის ნაწილაკების ლითონთან შერევით, ისე თხევად ლითონთან შეხებაში მყოფი ღუმელის ამონაგის, გამოსაშვები ხვრელისა და ღარის, ციციხვის ამონაგისა და სიფონური საჩამოსხმო მოწყობილობების ცეცხლგამძლე მასალებიდან. ეკსოგენური ჩანართები შეიძლება შევიტანოთ თხევად ლითონში აგრეთვე ფეროშენადნობებით, თხევადი თუჯითა და სხვა საკაზმე მასალებით.

ენდოგენური, რომლებიც წარმოიქმნებიან თხევად ლითონში მიმდინარე ქიმიური რეაქციების შედეგად.

თავის მხრივ, ენდოგენური არალითონური ჩანართები წარმოშობის დროის მიხედვით იყოფა ოთხ ჯგუფად (ტიპად):

1. პირველადი, რომლებიც წარმოიქმნებიან თხევად ლითონში, ლითონის განუანგვისა და ლეგირების დროს;

2. მეორადი, რომლებიც წარმოიქმნებიან ლითონის ორფაზა (თხევად-მყარ) მდგომარეობაში ყოფნის დროს;

3. მესამეული, რომლებიც წარმოიქმნებიან გამყარებულ ფოლადში, ალტროპიული გარდაქმნების დროს;

4. მეოთხეული, რომლებიც წარმოიქმნებიან მყარ ლითონში გარკვეული დროის გასვლის შემდეგ. ეს დრო შეიძლება იყოს ერთი თვე, ერთი წელი და მეტიც. ასეთი არალითონური ჩანართები, როგორც წესი, იწვევს ფოლადის, ე.წ., „დაბერებას“ ანუ „დაძველებას“.

ქიმიური შედგენილობის მიხედვით, არალითონური ჩანართების კლასიფიკაციის შემდეგი სახეებია:

1. მარტივი და რთული შედგენილობის ოქსიდები, მაგალითად, FeO , MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , სილიკატები, ალუმინატები, კალციუმ-ალუმოსილიკატები და სხვა;

2. სულფიდები, FeS , MnS , CaS და რთული შედგენილობის ოქსისულფიდები;

3. ფოსფიდები, Fe_3P , Fe_2P , Mn_3P_2 და სხვა;

4. ნიტრიდები TiN , AlN , ZrN_2 , VN , BN და სხვა;

5. აიროვანი ჩანართები, აიროვანი ბუშტულების CO , CO_2 და H_2 -ის სახით.

თუ ფოლადში საკმაო რაოდენობით არის ჰიდრიდწარმოქმნელი ელემენტები (Ti , Zr , Nb , V , Ce , La), მაშინ თეორიულად მოსალოდნელია ამ ელემენტების ჰიდრიდების წარმოქმნა, თუმცა, პრაქტიკულად, ფოლადში ჰიდრიდების არსებობა ნაკლებად საუარაუდოა. არალითონურ ჩანართებს შეიძლება მივაკუთვნოთ კარბიდებიც, მაგრამ ამ უკანასკნელების გაგლეჩა ფოლადების თვისე-

ბებზე იმდენად დიდი და მნიშვნელოვანია, რომ მათი შესწავლა ლითონმცოდნეობის ცალკე დარგს წარმოადგენს.

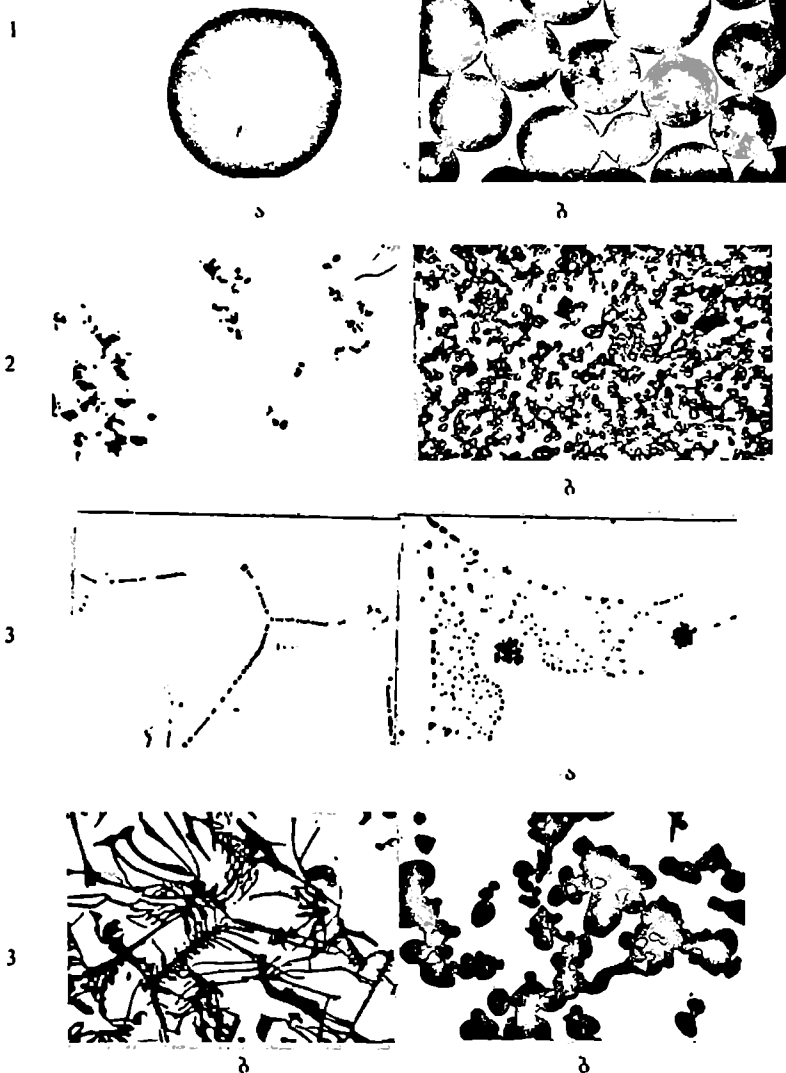
ყველა სახის არალითონური ჩანართისათვის დამახასიათებელია ჩანართის არალითონური ნაწილის (O, N, H, S და P) კარგი ხსნადობა თხევად ფოლადში, მაგრამ პრაქტიკულად – უხსნადობა მყარ ლითონში. ამიტომ ფოლადის გამყარების დროს ეს ჩანართები განიცდის ძლიერ ლიკვაციას, გამოიყოფა მეორადი ფაზების – ოქსიდების, სულფიდების, ნიტრიდების, ფოსფიდების სახით და, როგორც წესი, განთავსდება დენდრიტთა და მარცვალთა შორის სივრცეში, არღვევს ლითონის მთლიანობას. რის შედეგადაც უარყოფით ზეგავლენას ახდენს ფოლადის ხარისხზე. 2.13 და 2.14 სურათებზე წარმოდგენილია სხვადასხვა სახის არალითონური ჩანართები სხმულ და გაგლინულ (დეფორმირებულ) ფოლადში.

როგორც ამ სურათებიდან ჩანს, არალითონური ჩანართები საკმაოდ დიდი მრავალფეროვნებით გამოირჩევა. დისპერსული კორუნდი და ალუმინატები ხშირ შემთხვევაში სხმულ ლითონში ქმნის გროვებს. სულფიდური ჩანართები, როგორც წესი, თავსდება მარცვალთა შორის სივრცეში სურ. 2.13(3). გაგლინვის დროს ორივე სახის ჩანართები იღებს წაგრძელებულ ფორმას და ლითონში მწკრივი ჩანართების სახით გვევლინება სურ. 2.14(2).

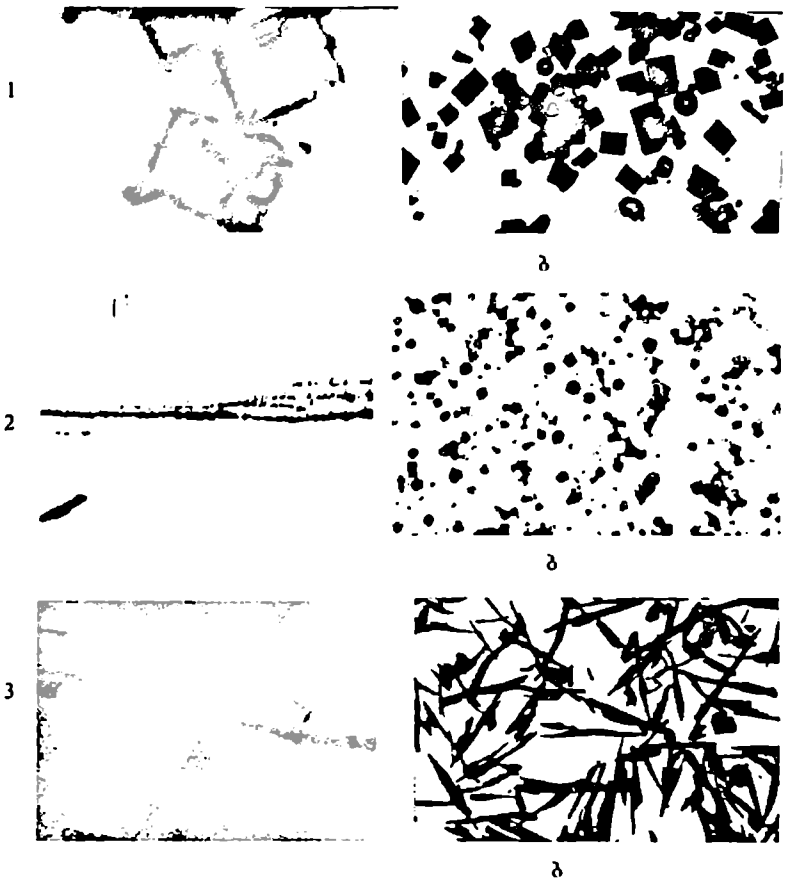
ფაზათა შორისი ურთიერთქმედებიდან გამომდინარე, წარმოქმნის შემდეგ არალითონური ჩანართები ესწრაფვის თხევად ლითონთან წონასწორობაში მოსვლას, რამდენადაც ამის საშუალებას იძლევა დიფუზიისა და ქიმიური რეაქციების სიჩქარეები. ამიტომ, არალითონური ჩანართები მათი წარმოქმნიდან საბოლოო ჩამოყალიბებამდე იცვლის როგორც ფორმას, ასევე ქიმიურ შედგენილობას.

თხევად ლითონში ჩასახული არალითონური ჩანართი იწყებს ზრდას და იძენს ამ ქიმიური ნაერთისათვის დამახასიათებელ კრისტალურ ფორმას. თუ არალითონური ჩანართის გამყარება უფრო დაბალ ტემპერატურებზე მიმდინარეობს ვიდრე თხევადი ფოლადისა, მაშინ ლითონის დაკრისტალებამდე ეს ჩანასახი თხევად მდგომარეობაშია, მრგვალი ანუ გლობულარული ფორმისაა და ინარჩუნებს ამ ფორმას გამყარების შემდეგაც.

ლითონში თბური ველისა და გრავიტაციული ძალების გავლენით ხდება არალითონური ჩანართების მოძრაობაში მოყვანა. ლითონიდან ჩანართების მოცილება შესაძლოა იმ შემთხვევაში, თუ ისინი ისეთ ზომებს აღწევენ, რომლებიც უზრუნველყოფენ გრავიტაციული ძალების გადამეტებას თბური ველის ძალებზე ან ამ ორივე ველის მიმართულების თანხვედრას ე.ი. მიმართული



სურ. 2.13. ფოლადისათვის დამახასიათებელი არალიტონური ჩანარები:
 1. სილიკატური გლობულარული ოქსიდები; 2. დისპერსიული ალუმინატები;
 3. სულფიდები.
 ა. მეტალოგრაფიული შლიფი; ბ. ლითონიდან ელექტროლიზით გამოყოფილი.



სურათი 2.14. ფოლადისათვის დამახასიათებელი არაღიოთონური
ჩანარტები ფოლადში

1. ნიტრიდები; 2. ბჭკარედი ოქსიდები დეფორმირებულ ლითონში; 3. წაგრძელებული სულფიდები დეფორმირებულ ლითონში

ა. მეტალოგრაფიული შლიფი; ბ. ლითონიდან ელექტროლიზით გამოყოფილი.

მოძრაობის მიღებას. ამრიგად, არალითონური ჩანართების მოცი-
ლების პროცესი ახალი ფაზის ჩასახვისა და მისი 'ხრდისაგან'
შედგება.

დადგენილია, რომ არალითონური ჩანართების ჩანასახის წარ-
მოქმნაზე დიდ გავლენას ახდენს ფაზათაშორისი დაჭიმულობა.
რამდენადაც ნაკლებია ფაზათაშორისი დაჭიმულობა ერთი და
იმავე გადაჯერების შემთხვევაში, იმდენადვე იოლად წარმოიქმნება
მეტე ჩანასახი.

არალითონური ჩანართების გამსხვილებისა და აბაზანიდან
მის მოშორებაზე დიდ გავლენას ახდენს მათი კოაგულაცია (შეერ-
თება) და კოალესცენცია (შერწყმა). რამდენადაც დაბალია არა-
ლითონური ჩანართების დნობის ტემპერატურა, იმდენად თავის-
უფლად მიმდინარეობს მათი გამსხვილება.

თხვეადი ლითონის თბური მოძრაობის შედეგად, არალითონ-
ური ჩანართების ნაწილი ხვდება წიდისა და ლითონის გამყოფ
ზედაპირზე. რაც უფრო დიდია ჩანართისა და წიდის ურთიერთ-
ადგეზია, მით უფრო ადვილად გადადის არალითონური ნაწილი, კი
ლითონიდან წიდაში.

არალითონური ჩანართების მოცილების ცუდი პირობები იქმ-
ნება მაშინ, როცა ისინი წარმოიქმნებიან ლითონის კრისტალი-
ზაციის პერიოდში: ტემპერატურის შემცირებით იზრდება არალი-
თონური ჩანართებისა და თვით ლითონის სიბლანტე, აგრეთვე,
კრისტალების ზრდა ხელს უშლის ჩანართების ამოტივტივებას.
ამის შედეგად, ჩანართების უმეტესი ნაწილი ისევ ლითონში რჩება.

ზემოთ აღნიშნული ოთხი ტიპის არალითონური ჩანართე-
ბიდან მხოლოდ პირველად ჩანართებს (რომლებიც წარმოიქმნებიან
თხვეად ლითონში) აქვს საშუალება ამოტივტივდეს ლითონიდან
და გადავიდეს წიდაში. ყველა სხვა შემთხვევაში – მეორადი,
მესამეული და მეოთხეული ჩანართები მთლიანად რჩება ლითონში.
2.13 და 2.14 სურათზე მოყვანილი არალითონური ჩანართების
უმრავლესობა მეორადი წარმოშობისაა. მესამეული და მეოთხეული
არალითონური ჩანართების გამოყოფა ხდება მყარ ლითონში.
ამიტომ ისინი ძალიან დისპერსიულია და მათი დანახვა მხოლოდ
ელექტრონული მიკროსკოპით ხდება შესაძლებელი.

ფოლადში არალითონური ჩანართების ჯამური შემცველობა
დამოკიდებულია ლითონში ჟანგბადის, გაოგირდის, ფოსფორისა
და აზოტის რაოდენობაზე და შეიძლება იცვლებოდეს საკმაოდ
დიდ დიაპაზონში 0,01 %-დან 0,2 %-მდე, იმისდა მიხედვით, თუ
რომელ აგრეგატშია გამოდნობილი ფოლადი, როგორ არის ის
დამუშავებული ციცხვში და როგორ ხდება მისი ჩამოსხმა ბოყებში

ან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე. თხევადი ლითონის დამუშავება ციცხეში სინთეზური წიდეებით და ინერტული აირებით საგრძნობლად ამცირებს მასში არაალითონური ჩანართების რაოდენობას. ციცხვიდან გამოსული ლითონის ჭაგლი ურთიერთქმედებს ატმოსფეროსთან და ხდება მისი ხელახალი დაჟანგვა. რაც თავისთავად ზრდის ოქსიდური ჩანართების რაოდენობას ზოდში. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად სასურველია ლითონი ჩამოისხას ინერტული აირის გარემოში ან კიდევ მივიღოთ სხვა ზომები, რომლებიც შეამცირებენ ლითონის მეორად დაჟანგვას.

2.5.4. ფოლადიდან არაალითონური ჩანართების მოშორების მექანიზმი

ფოლადიდან არაალითონური ჩანართების მოშორებაში მნიშვნელოვანია მათი გამსხვილება (კოაგულაცია). ცნობილია კოაგულაციის ორი სახეობა: პერიკინეტიკური (ბროუნის მოძრაობით გამოწვეული) და ორთოკინეტიკური (გამოწვეული მიმართული ძალოვანი ველით, მაგალითად გრავიტაციულით). პ. ტეილორის და ტ. რ. კროიტის ნაშრომების მიხედვით, პერიკინეტიკური კოაგულაციის დროს მოტივტივე ნაწილაკების გამსხვილების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით

$$v_{1,2} = 4\pi D_{1,2} \cdot R_{1,2} \cdot n_1 \cdot n_2, \quad (2.206)$$

სადაც $D_{1,2}$ განსხვავებული ზომის ორი ნაწილაკის მასათა გადატანის კოეფიციენტების ჯამია; $R_{1,2}$ მათი რადიუსების ჯამია; n_1 და n_2 ხსნარში ნაწილაკების კონცენტრაციაა.

არაალითონური ჩანართების მოშორების პროცესში მეტი უპირატესობა აქვს ორთოკინეტიკურ კოაგულაციას, რომელზეც გავლენას ახდენს გრავიტაციული ველის შემოქმედება და ნაწილაკების ზომათა შორის განსხვავება. ლითონისა და ჩანართის სიმკვრივეთა განსხვავების გამო, ხდება ჩანართის ამოკურება გარკვეული სიჩქარით. ამასთან ერთად, დიდი ჩანართი დაეწევა პატარას და მოხდება მათი შეერთება-გადიდება.

ტ. რ. კროიტის მიხედვით, განსხვავება ორთოკინეტიკურსა და პერიკინეტიკურ კოაგულაციას შორის გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$\frac{V_n}{V_s} = \frac{\mu(R_{1,2})^3 \frac{dv}{dx}}{2k\tau}, \quad (2.207)$$

სადაც v_0 და v_1 ორთოკინეტიკური და პერიკინეტიკური სიჩქარე-
ებია; μ გარემოს სიბლანტეა; $\frac{dv}{dx}$ ნაწილაკების x მიმართულებით
მოძრაობის სიჩქარის გრადიენტი; $R_{1,2}$ განსხვავებული ზომის
ნაწილაკების რადიუსების ჯამია; k ბოლცმანის მუდმივაა; T
ტემპერატურაა.

როგორც მოყვანილი ფორმულიდან ჩანს, ჩანართის კოაგულა-
ციის სიჩქარე დამოკიდებულია გარემოს სიბლანტეზე, ჩანართების
ზომათა შორის არსებულ განსხვავებაზე და მათი მოძრაობის
სიჩქარის გრადიენტზე.

კოაგულაციის პროცესზე გავლენას ახდენს გარემოს მოძრა-
ობის ხასიათი. მიუღერის თანახმად, სითხის მიმართული მოძრაობა
იწვევს კოაგულაციის აღბათობის ზრდას. ამის გამო და სიჩქარის

გრადიენტის $\frac{dv}{dx}$ გაზრდის შედეგად ძლიერდება ციცხვში ლი-
თონის ცირკულაცია და მოძრაობის ინტენსიურობა. ეს კი, თავის
მხრივ, ხელს უწყობს ჩანართის კოაგულაციას და მოშორებას.
ჩანართის გამსხვილებას ხელს უწყობს აგრეთვე გარკვეულ ზღვრა-
მდე ტურბულენტური პულსაციის ზრდა.

ფოლადიდან სფერული ფორმის არალითონური ჩანართის
მოშორების სიჩქარე გამოითვლება სტოქსის ფორმულით

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho_L - \rho_F}{\mu}, \quad (2.208)$$

სადაც g არის სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ²; r - არალითონური
ჩანართის ზომა, მ; ρ_L და ρ_F - ლითონისა და ჩანართის სიმკვრივე
(კუთრი წონა) შესაბამისად, კგ/მ³; μ - თხევადი ფოლადის სიბლანტე.

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ არალითონური ჩანართის
მოცილების სიჩქარე ყველაზე მეტად მის ზომაზეა დამოკიდებული.

უფრო ზუსტად არალითონური ჩანართის მოშორების სიჩქარე
გამოითვლება პ. ე. ლიაშჩენკოს ფორმულით

$$v_1 = k_1 \sqrt{\frac{gd(\rho_L - \rho_F)}{\mu}}, \quad (2.209)$$

სადაც g სიმძიმის ძალის აჩქარებაა; d ჩანართის დიამეტრია; ρ_L
და ρ_F ლითონისა და ჩანართის სიმკვრივეებია; μ გარემოს დინამი-
კური სიბლანტეა; k_1 მუდმივაა.

ფოლადის გამოშვების პროცესში ხდება ციცხვში მყოფი
ლითონის ინტენსიური არევა. ციცხვში შეიმჩნევა ლითონის აღმა-

ვალი და დაღმავალი ცირკულაციური ნაკადები. არალითონური ჩანართის ამოცურების მიმართულეა ლითონის ნაკადის მოძრაობის მიმართულეებს ან თანხედება, ან მისი საწინააღმდეგოა. ამის გამო, ლითონის ნაკადში არალითონური ჩანართის მოძრაობის სიჩქარე გამოისახება ფორმულით

$$v = v_1 \pm v_2 \quad (2.210)$$

სადაც, v_1 ჩანართის ამოცურების სიჩქარეა წყნარი ლითონიდან; v_2 ლითონის ცირკულაციური ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეა (დადებითი ნიშანი ეხება აღმავალ ნაკადს).

ამრიგად, არალითონური ჩანართის მოშორების ჯამური სიჩქარე იქნება

$$v = k \sqrt{\frac{gd(\rho_{\text{ლ}} - \rho_{\text{ჩ}})}{\mu}} \pm v_2 \quad (2.211)$$

ციცხეში წიდა ახდენს არალითონური ჩანართების ასიმილაციას თუკი დავიცავთ პირობას

$$\sigma_{\text{ჩ,წ}} - \sigma_{\text{წ,წ}} > 0 \quad (2.212)$$

სადაც $\sigma_{\text{ჩ,წ}}$ ფაზათაშორისული დაჭიმულობაა ლითონისა და ჩანართს შორის; $\sigma_{\text{წ,წ}}$ იგივეა წიდასა და ჩანართს შორის.

წიდა მით უფრო სწრაფად ახდენს ჩანართის ასიმილაციას, რაც უფრო ენერგიულია (გარკვეულ ზღვრამდე) ლითონის აღმავალი ცირკულაციური ნაკადი, რომელიც თან გაიყოლებს ჩანართს და მიიტანს ლითონისა და წიდის გაყოფის საზღვარზე.

ციცხეში ლითონის ცირკულაცია ყოველთვის არ უწყობს ხელს არალითონური ჩანართის მოშორებას. ლითონის ცირკულაცია მაშინ უწყობს ხელს ჩანართის მოშორებას, როდესაც მისი თვითნებური ამოცურების მიმართულეა ემთხვევა ლითონის აღმავალ ნაკადს. ხშირად კი ციცხეში ადგილი აქვს ლითონის დაღმავალ ნაკადს და მას ჩანართი ჩამოაქვს ლითონის ქვედა ზონაში. ფოლადის ხარისხის გაზრდის მიზნით, უფრო ხელსაყრელია აირებით ლითონის ცირკულაცია, რასაც აღწევენ ციცხეის ფსკერიდან ინერტული აირების გაქრევით. ამ დროს, ჩანართის მოძრაობის თვითნებური მიმართულეა ყოველთვის ემთხვევა აირის ნაკადის მოძრაობის მიმართულეებს. მიღებულა, რომ ციცხეში ლითონის არევაზე იხარჯება ლითონის ჭავლის საწყისი ენერგიის 25–30 %. აირებით გამოწვეული ლითონის არევის მუშაობა გამოითვლება ე.ს. კოჩის ფორმულით

$$A = P_0 V_0 \frac{T}{273} \ln \left(1 + \frac{H\rho_{\text{ლ}}}{P_0} \right) \quad (2.213)$$

სადაც P_0 ატმოსფერული წნევაა; V_0 აირის ნორმალური მოცულობაა; H ლითონის სიმაღლეა; $\rho_{\text{ჰ}}$ ლითონის სიმკვრივეა; T ტემპერატურაა.

ლითონის სიმაღლეს (H) პირველი მიახლოებით იღებენ ციციხვის სიმაღლის ნახევრის ტოლად. გამოყოფილი აირების მოცულობა აღებულია $V_0 = 1.635$ მ³/ტ; ხოლო ტემპერატურა – $T = 1873$ K. ასეთ შემთხვევაში, ციციხვის ტვეადობის მიხედვით, აირებით გამოწვეული არევის მუშაობა 25–28-ჯერ აღემატება ფოლადის ჭავლის ენერჯით გამოწვეულ მუშაობას.

არალითონური ჩანართების მოშორების პროცესისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს აირებით არალითონური ჩანართის ყვლოტაციის უნარს.

არალითონური ჩანართი აირის ბუშტულასთან შეჯახებისას მიეწებება მას. შეწებების ძალა გამოითვლება ფორმულით

$$F = \frac{R \cdot \sin \theta}{r}, \quad (2.214)$$

სადაც R ბუშტულის რადიუსია; θ ჩანართისა და ლითონის დასველების განაპირა კუთხეა; r ჩანართისა და აირის ბუშტულას კონტაქტის ზედაპირის რადიუსია.

როგორც ფორმულიდან ჩანს, შეწებების ძალა მით უფრო მეტია, რაც უფრო მეტია აირის ბუშტულის რადიუსი და დასველების განაპირა კუთხე ($\sin 0^\circ = 0$; $\sin 90^\circ = 1$) და რაც ნაკლებია r .

დასველების განაპირა კუთხე, უმეტეს შემთხვევაში, 90° -ზე მეტია; რაც თერმოდინამიკურად შესაძლებელს ხდის ფლოტაციით არალითონური ჩანართის მოშორებას.

2.5.5. აირებისა და არალითონური ჩანართების გაველენა ფოლადის თვისებებზე

დიდია აირების აზოტისა და წყალბადის გაველენა ფოლადის თვისებებზე. აზოტის შემთხვევაში ეს გაველენა შეიძლება სამი თვალსაზრისით განვიხილოთ:

1. აზოტი, რომელიც ბუნებრივად იხსნება ფოლადში მისი დნობის დროს ატმოსფეროსთან შეხების გამო. ამ შემთხვევაში, გახსნილი აზოტის რაოდენობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რომელ აგრეგატში ხდება ფოლადის დნობა. ბესემერის და თომასის კონვერტერებში, როდესაც ლითონისა და ჰაერის შეხების ზედაპირი ძალიან დიდია, ფოლადში გახსნილი აზოტის რაოდენობა

მაქსიმალურია და იცვლება 0,012–0,025 % სასიდერებში. კონვერტერულ ფოლადში, როდესაც ლითონის გაქრევა ხდება ტექნიკურად სუფთა ჟანგბადით, აზოტის რაოდენობა მინიმალურია (0,002–0,0035 %). თუ ფოლადებში სპეციალურად არ არის შეტანილი ნიტრიდწარმოქმნელი ელემენტები (Ti, Al, V და სხვა), ნიტრიდების გამოყოფა ხდება მხოლოდ ლითონის გამყარების და დაბალ ტემპერატურამდე გაცივების შემდეგ, რის გამოც ფოლადის სიმტკიცე იზრდება, ხოლო პლასტიკურობასთან ერთად სცირდება დარტყმითი სიბლანტეც და ლითონს მიდრეკილება უნდება მყიფე რღვევის მიმართ;

2. აზოტი, როგორც მალეგირებელი ელემენტი, სპეციალურად შეჰყავთ ფოლადში, რის შედეგადაც ხდება აუსტენიტის არის გაფართოება და მისი სტაბილიზაცია. აზოტთან ერთად აღუძინისა და ვანადიუმის შეყვანა ხელს უწყობს სპეციალური ნიტრიდების წარმოქმნას, რომლებიც განაპირობებენ წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებასა და ფოლადის სიმტკიცის გაზრდას პლასტიკურობის მაღალი მანქანებლების შენარჩუნებით;

3. ფოლადის ზედაპირის დაფარვა ნიტრიდებით, ცემენტაციის ანალოგიურად. ლეგირებულ ფოლადებში დააზოტების შედეგად მიიღება ბევრად უფრო მტკიცე ზედაპირი, ვიდრე ეს შესაძლებელია ცემენტაციის დროს. ზოგ შემთხვევაში ზედაპირის დაფარვა ხდება ერთდროულად ნახშირბადით და აზოტით, რასაც დაციანება ეწოდება.

აზოტისაგან განსხვავებით, წყალბადის გავლენა ფოლადის თვისებებზე მხოლოდ უარყოფითია. ფოლადში გახსნილი წყალბადი ლითონის გაცივების დროს, როგორც წესი, არ წარმოქმნის ნაერთებს (ჰიდრიდები, ჰიდრატები) და გამოიყოფა მოლეკულის სახით. მოლეკულური წყალბადი ლითონში ავითარებს დიდ წნევას და თერმულ ძაბვებთან ერთად იწვევს ლითონის მთლიანობის რღვევას ბზარების, ფლოკენებისა და სხვა დეფექტების წარმოქმნით. წყალბადი განსაკუთრებით საშიშია ხარისხოვანი ლეგირებული ფოლადებისათვის. რომლებშიც წყალბადის ხსნალობა ბევრად მეტია, ვიდრე დაბალნახშირბადიან ჩვეულებრივ ფოლადებში. ამ შემთხვევაში გაგლინული ლითონის ბლუმებს ათავსებენ სპეციალურ თერმულ ჭებში, სადაც ლითონი ძალიან ნელა ცივდება და ამით საგრძნობლად ამცირებენ წყალბადის გამო დაზიანებული ნაგლინის რაოდენობას – წუნს.

ფოლადის თვისებებზე არალითონური ჩანართების გავლენა დამოკიდებულია მათ რაოდენობაზე, ფორმებსა და განაწილების ხასიათზე. მართალია, ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი

არალითონური ჩანართების მოქმედების მექანიზმი ფოლადის თვისებებზე. მაგრამ ბევრი რამ დაბეჯითებით შეიძლება ითქვას. მაგალითად, ცნობილია, რომ სულფიდური ჩანართების დიდი რაოდენობა ფოლადში აუარესებს მისი გლინივისა და ჭედიის პირობებს, რაც გამოიხატება ბზარების გაჩენაში. იმ ფოლადებს, რომლებშიც გოგირდი რკინის სულფიდური ვეტექტიკითაა წარმოდგენილი, ახასიათებთ ცხელტეხადობა, რაც გამოწვეულია დნობის დაბალი ტემპერატურით (988 °C). ლითონის ცხლად დამუშავებისას არალითონური ჩანართების დიდი ნაწილი ადვილად დეფორმირდება და წაგრძელება დამუშავების მიმართულებით. მყიფე ჩანართები იმსხვრევა და დეფორმირებულ ლითონში ბჭკარედ ფორმას იძენს. აღნიშნულიდან გამომდინარე, დეფორმირებული ლითონის განივ და გრძივ ნიმუშებში შემომჩვენვა მკვეთრი სხვაობა მექანიკურ თვისებებს შორის. სხვანაირად რომ ვთქვათ, საქმე გვაქვს ლითონის მექანიკური თვისებების ანისოტროპიასთან. ეს მოვლენა შეიძლება აიხსნას ლითონის დაძაბულობის ერთგვაროვნების დარღვევით და ძაბვათა კონცენტრაციით არალითონური ჩანართების ირგვლივ. ამ შემთხვევაში არალითონური ჩანართები ასრულებს ნასერის (ჩანაჭრის) როლს. ამის გამო, ოქსიდური ჩანართები, რომლებიც გლინივის შედეგად ღებულობენ წაგრძელებულსა და ბრტყელ ფორმებს, უფრო მეტად აუარესებს ფოლადის თვისებებს, ვიდრე გლობულარული, არადეფორმირებადი ჩანართები. რაც უფრო მეტია ლითონში არადეფორმირებადი ჩანართები, მით უფრო ნაკლებია მათი გავლენა ფოლადის მექანიკურ თვისებებზე. განსაკუთრებით ცუდია, როცა ჩანართები აპკების სახით განლაგდება ლითონის მარცვლებს შორის. ასეთ შემთხვევაში დარტყმითი სიბლანტე შეიძლება 30–70 %-ით შემცირდეს.

ნიტრიდების წვრილი ჩანართები შეიძლება სასარგებლოც გამოდგეს, თუ ისინი გამოიყოფიან აუსტენიტის მარცვლებს შორის და ამით ხელს შეუწყობენ ფოლადის წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას. ასეთია, მაგალითად, Al-ის და V-ის ნიტრიდები. ფოლადში ალუმინის მცირე რაოდენობით შეყვანა (0.01 %) საშუალებას იძლევა წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას. ტიტანის და ცირკონიუმის ნიტრიდების დიდი, უხეში ჩანართები ხშირ შემთხვევაში, იწვევს მარცვალთშორის (კრისტალოთშორის) სიმყიფეს. ზოგ შემთხვევაში ფოლადის სხმული ნამზადისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს არა პლასტიკურობას და სიმტკიცეს, არამედ მისი ზედაპირის საჭრელი იარაღებით დამუშავების გაადვილებას. ასეთ შემთხვევაში ფოლადში სპეციალურად შეყვანეთ გოგირდის საკმაოდ დიდი რაოდენობა (0,1 %-მდე), რაც საგრძობლად აადვილებს ზედაპირის დამუშავებას.

III ბანყოფილება

თ ა ვ ი I

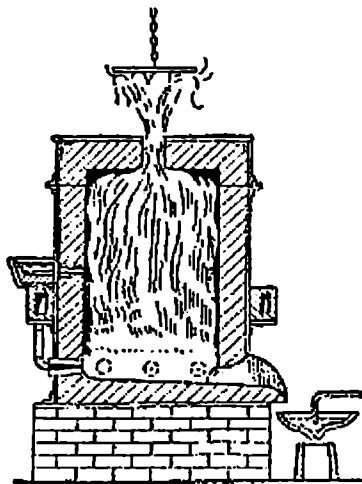
ფოლადის წარმოების კონვერტირული ხერხები

3.1.1. ბესემერის პროცესის აღმოცენება და განვითარება

XIX საუკუნის მეორე ნახევარში სწრაფი ტემპით დაიწყო მანქანათმშენებლობის, სარკინიგზო ტრანსპორტის, გემთმშენებლობისა და მრეწველობის სხვა დარგების განვითარება. ამის შედეგად საგრძნობლად გაიზარდა მოთხოვნილება ფოლადზე, რის გამოც გუნდური და პუდლინგის ხერხებით შეუძლებელი გახდა მისი დაკმაყოფილება. ეს ხერხები ვერც რაოდენობრივი და ვერც თვისობრივი მაჩვენებლებით ვერ უზრუნველყოფდა იმ დროისათვის წამოჭრილ მოთხოვნებს. იაფფასიანი და დამაკმაყოფილებელი ხარისხის თხევადი ფოლადის დიდი რაოდენობით მიღების პრობლემა წარმატებით გადაჭრა ინგლისელმა მექანიკოსმა პენრი ბესემერმა (1813–1898).

1854–1855 წლებში ქ. შეფილდის მეტალურგიულ ქარხანაში იგი ატარებდა ექსპერიმენტებს თხევადი ფოლადის მისაღებად. ამ ცდების შედეგად მიღებული დადებითი მონაცემების საფუძველზე 1855 წ. 17 ოქტომბერს მან მიიღო პატენტი „გამდნარ თუჯში ორთქლის, ჰაერის ან მათი ნარევის შებერვის გზით თხევადი ფოლადის მიღების შესახებ“.

თავდაპირველად ბესემერი ექსპერიმენტებს ატარებდა ცეცხლგამძლე თიხისაგან დამზადებულ ტიგელში (ქოთანში), რომელშიც ტვირთავდა მყარ თუჯს და ათავსებდა ქურაში. თუჯის გადნობის შემდეგ ქურაში თიხის მილით უბერავდა ჰაერს. შემდგომში ბესემერმა ააგო სტაციონარული კონვერტერი (სურ. 3.1). კონვერტერში ასხამდა თხევად თუჯს და ერთდროულად იწყებდა ჰაერის შებერვას ქვედა ნაწილში გვერდიდან ჩადგმული საქშენის საშუალებით. მზა ფოლადის გამოშვება ხდებოდა საქშენის მოპირდაპირე მხარეს კონვერტერის ფსკერთან დატანებული ხერედიდან.



სურ. 3.1. პირველი
სტაციონარული კონვერტერი

სტაციონარულ კონვერტერს ჰქონდა დიდი ნაკლი. ჰაერის შებერვა გრძელდებოდა კონვერტერიდან ლითონის სრულ გამოსვლამდე. ეს იწვევდა ფოლადის ზედმეტად დაჟანგვას და ხელს უწყობდა წუნის ზრდას. ბესემერმა გაითვალისწინა ეს უარყოფითი მხარეები და 1860 წ. შეფილდში ააგო მბრუნავი კონვერტერი, რომლის სახე და მოწყობილობა შემდგომშიც უცვლელი დარჩა.

ბესემერის ხერხი სწრაფად გავრცელდა მსოფლიოში. ამ ხერხით ფოლადის მიღების ცდები რუსეთში დაიწყო 1857 წ. ვსევოლოდვილის ქარხანაში, 1859 წ. – ნიჟნე-ტაგილის, ვერხნე-ტურინისა

და სხვა ქარხნებში.

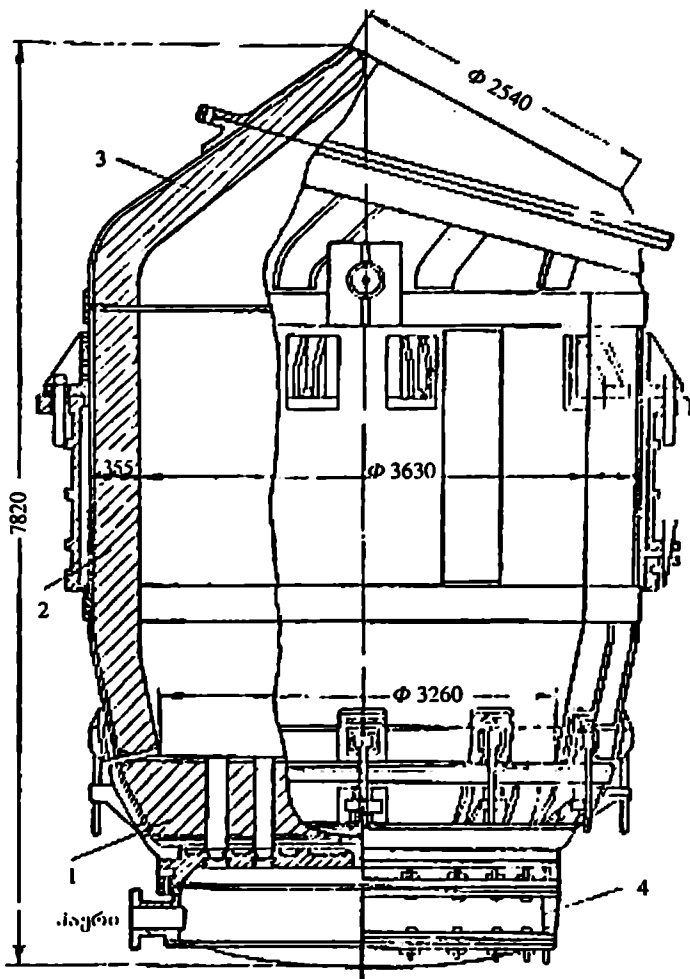
ბესემერის ხერხი ინგლისის გარდა ფართოდ გავრცელდა შვედეთში, გერმანიაში, საფრანგეთში და განსაკუთრებით, აშშ-ში.

ბესემერის ხერხით ფოლადის წარმოებამ რუსეთში 1913 წ. შეადგინა 597 ათასი ტონა, ამერიკაში კი ჯერ კიდევ 1906 წ. გამოაღწეს 12,5 მლნ ტ.

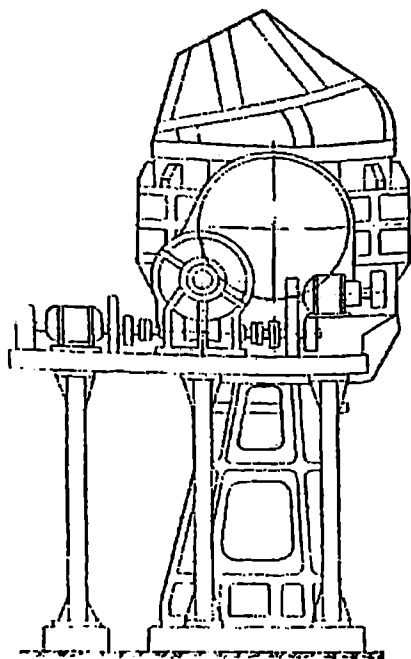
3.1.2. ბესემერის კონვერტერის მოწყობილობა

ბესემერის კონვერტერი წარმოადგენს მსხლისმაგვარ ჭურჭელს. მისი გარე ნაწილია 15–30 მმ სისქის ფურცლებისაგან დამოქლონებით ან შედუღებით დამზადებული გარსაცმი, რომელიც შიგნიდან ამოგებულია მჟავე (95–96 % SiO_2 -ის შემცველი) „დინასის“ აგურით. კონვერტერის რეტორტა შედგება სამი ნაწილისაგან: სუდა ნაწილია ხახიანი მუზარადი, შუაა ცილინდრული ნაწილი და ქვედა – მისადგმელი ნაწილი ანუ ფსკერი საძაერო კოლოფით (სურ. 3.2).

კონვერტერის კედლის ამონაგის სისქეა 300–400 მმ. ლითონის გარსაცმსა და ამონაგს შორის გაკეთებულია 30–50 მმ სისქის თბოსაიზოლაციო ფენა (დინასის აგურის წვრილი ღორღი ან



სურ. 3.2. 35 ტ ტეფადობის კონვერტერი. 1 - ფსკერი; 2 - კონვერტერის ცილინდრული ნაწილი; 3 - მუხარადი; 4 - საპაერო კოლდოფი



სურ. 3.3. კონვერტერის საერთო ხედი

ქაფდინასი). კონვერტერის ცილინდრული ნაწილი თავისუფლად შედის სხმული ფოლადის რგოლში და მაგრდება მასზე კავით (ჩანგლით).

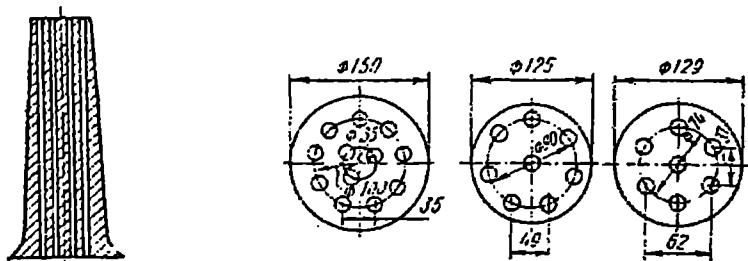
გვერდიდან ფოლადის რგოლს ურთიერთსაწინააღმდეგო მხარეს აქვს პოტოტიკები (სატაკი). კონვერტერი მათი საშუალებით ევრდნობა პოსტამენტს (სადგარს) და იხრება ჰორიზონტალური ღერძის მიმართ ნებისმიერი კუთხით (სურ. 3.3).

ერთ-ერთი პოტოტიკი ღრუა და მილყელითაა მიერთებული საძაერო კოლოფთან. თუჯის გაქრევისათვის საჭირო ჰაერი შედის ჰაერმბერი მანქანიდან ღრუ პოტოტიკში. იქიდან კი მილყელით მიეწოდება საძაერო კოლოფს, საიდანაც ფსკერში დატანებული შამოტის ქშინებით გადაადის კონვერტერის რეტორტაში. ჰაერის მიწოდების ასეთი

სისტემა უზრუნველყოფს გაქრევის უწყვეტად ჩატარებას და მის შეწყვეტას კონვერტერის ვერტიკალურიდან ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში გადაყვანისას.

კონვერტერის მუხარადიდან გამოძაეალი ცხელი აირების ზეგაველენით ამონაგის დაწვის თავიდან ასაცილებლად მუხარადს უკეთდება სხმული ფოლადისგან დამზადებული საცველელი ხახა.

კონვერტერის ფსკერი მზადდება მისადგმელი, რაც, საჭიროების შემთხვევაში, უზრუნველყოფს მის სწრაფად შეცვლას. ფსკერი კონვერტერის კორპუსზე მაგრდება კავით (ჩანგლით) და დასაჭიმი ჭილიბით. ფსკერის გარსაცმზე დამაგრებულია საძაერო კოლოფი ჰაერის მილყელით. ფსკერი მზადდება დატკეპნით ცეცხლგამძლე მასისაგან, რომელიც წარმოადგენს კვარცისა და შამოტის ფხვნილების ნარევს ცეცხლგამძლე თიხასთან. დატკეპნის შემდეგ ფსკერს 41 საათის განმავლობაში აშრობენ 500 °C ტემპურატურაზე აირზე მომუშავე კამერულ ღუმელში და შემდეგ 4 საათის განმავლობაში აცივებენ. ფსკერი მზადდება ბუდეებიანი



სურ. 34. ქშინის ვერტიკალური ჭრილი და საქშენების განაწილება ქშინში

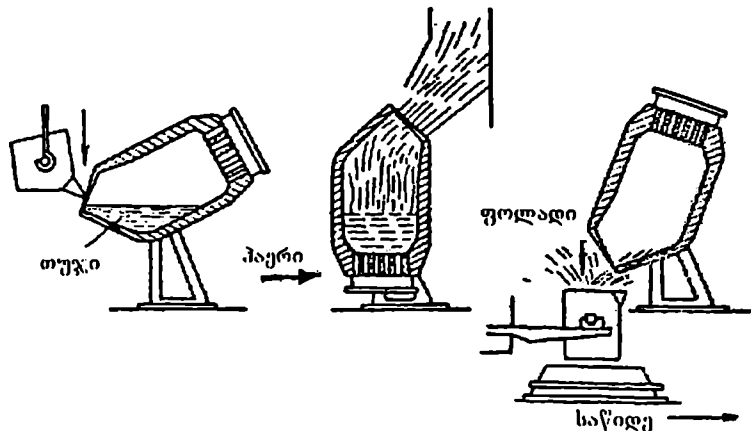
და მისი სისქეა 500–700 მმ. ბუდეებში იდგმება შამოტის ქშინები. ქშინი წაკვეთილი კონუსის ფორმისაა და აქვს 12–16 მმ დიამეტრის 7–12 ხერეული (საქშენი) (სურ. 34).

ქშინის სიმაღლე ფსკერის სისქის ტოლია. ფსკერის დაპროექტებისას უნდა განგვახდეროთ ქშინების რიცხვი და ფსკერში მათი განაწილების ხასიათი. ქშინის რიცხვის დადგენისას გამოდიან მოსახრებებიდან, რომ საქშენების ხვედრითი ფართობი იყოს 8–15 სმ² ერთ ტონა ჩანატვირთაზე. ამის მიხედვით ვაღკადკე გამოთვლიან საქშენთა და ქშინების საჭირო საერთო რაოდენობებს. ქშინების განაწილებისას გასათვალისწინებელია, რომ ფსკერის ცენტრიდან ყველაზე დაშორებულ საქშენსა და კონვერტერის კედელს შორის უნდა დარჩეს გარკვეული სივრცე, ხალაც არ გაიყდის პაერი. ამ დროს კონვერტერში წარმოიქმნება თხევადი დითონის პერიფერიული ცირკულაციური ნაკადი, რაც ხელს უწყობს აბაზანის ინტენსიურ არევას. ხვედრითი ცირკულაციური კვეთი უნდა იცვლებოდეს 1800–2000 სმ²/ტ ფარგლებში. მჟავე ბლანტ წიდაზე მუშაობისას კონვერტერის კედლის მედგობაა 1000 დნობა, ხოლო მანგანუმის ქვეუანგის დიდი რაოდენობის შემცველი თხვეადუნადი წიდის შემთხვევაში – 500–600. კონვერტერის ნატკეპნი ფსკერის მედგობაა 20–30 დნობა, ჩამოსხმულის – 70–75, ხოლო ანაკრებისა – 100–180.

3.1.3. ფოლადის დნობა ბესემერის პროცესში

ბესემერის პროცესით ფოლადის დნობისათვის დამახასიათებელია კონვერტერის სამ მდგომარეობაში ყოფნა. ესენია: საწყისი, მუშა და საბოლოო მდგომარეობები. საწყის მდგომარეობაში წინასწარ გახურებულ კონვერტერს დახრიან („წააქცე-

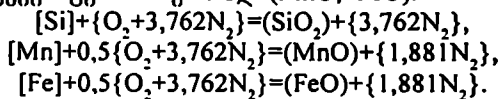
ვენ“) 90°-ით – დააწვენენ ზურგზე და წაასხამენ თხევად თუჯს. ამის შემდეგ კონვერტერს გადაიყვანენ მუშა – ვერტიკალურ მდგომარეობაში და ერთდროულად იწყება ჰაერის შებერვა 0,2–0,25 მგპა წნევით*, რათა თხევადმა თუჯმა არ ამოავსოს საქშენები. დნობის დამთავრების შემდეგ კონვერტერს შემოაბრუნებენ ვერტიკალური ღერძის მიმართ 160°-ით, შეწყვეტენ გაქრევას და ფოლადს წაასხამენ ციცხეში, ხოლო წიდას – საწიდე ფიალაში (სურ. 3.5).



სურ. 3.5. ბესემერის კონვერტერის მდგომარეობები თუჯის წასხმის, შებერვისა და ფოლადის გამოშვებისას

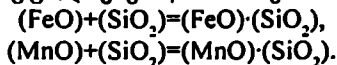
ბესემერის პროცესის არსს წარმოადგენს თხევად თუჯში ჰაერის შებერვის გზით მინარეების ამოწვა (დაჟანგვა) და ფოლადის მიღება. კონვერტერში მინარეების ამოწვის სინქარე მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული, ძირითადად კი – დამჟანგველის (ჰაერის) მიწოდების ინტენსიურობაზე. დნობის პროცესი შედგება სამი პერიოდისაგან: 1) წიდას წარმოქმნის ანუ ნაპერწკლის პერიოდი, 2) ალის პერიოდი და 3) ევამლის პერიოდი.

პირველ პერიოდში თუჯიდან ინტენსიურად ამოიწვება სილიციუმი და მანგანუმი, ხოლო გარკვეული რაოდენობით იჟანგება რკინა(3. მათი დაჟანგვის პროდუქტებია კაჟმიწა SiO_2 , მანგანუმისა და რკინის ქვეჟანგებთან ერთად (MnO , FeO).



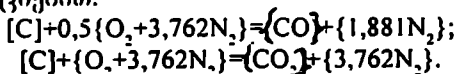
* რუდაქორისაგან: ეს წნევა მაშინაა საკმარისი, როდესაც კონვერტერში წასხმული თუჯის აბაზანის სიღრმე მშვიდ მდგომარეობაში შეადგენს 350–450 მმ. აბაზანის სიღრმის ეს მნიშვნელობა ნვეულებრივია ბესემერის კონვერტერებისთვის.

ეს ჟანგულები ურთიერთქმედებს ერთმანეთთან. შედეგად წარმოიქმნება წიდა, რომელიც შეიცავს რკინისა და მანგანუმის სილიკატებს თავისუფალ კაჟმიწასთან ერთად.



პირველ პერიოდში რეტორტის თავიდან ამოიფრქვევა ნაპერ-
წკლები. ეს იმით აიხსნება, რომ კონვერტერში ჩასხმულ შედარებით
ბლანტ თუჯში გამავალ ჰაერს გამოაქვს მისი წვეთები. კონვერ-
ტერის თავზე ხდება მათში მყოფი ნახშირბადის დაჟანგვა, წარმო-
ქმნილი ბუმტულების გახლეჩა და ნაპერწკლების გაფრქვევა.
პირველ პერიოდში ნახშირბადი უმნიშვნელო სიჩქარით იჟანგება,
ხოლო კონვერტერიდან ამოდის მკრთალი მოყავისფრო მოკლე
აღს. ლითონის ტემპერატურა იზრდება 300—400 გრადუსით.

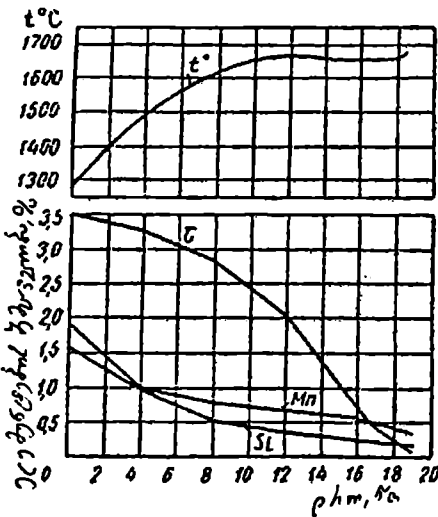
მეორე პერიოდში თუჯში სილიციუმისა და მანგანუმის კონ-
ცენტრაციების შემცირების შემდეგ იწყება ნახშირბადის ამოწვა
შემდეგი რეაქციებით:



ამომწვარი ნახშირბადის 90 % იჟანგება ნახშირბადის მონო-
ოქსიდამდე (ნახშირჟანგამდე), ხოლო 10 % კი — დიოქსიდამდე
(ნახშირორჟანგამდე). წარმოქმნილი ნახშირჟანგის ნაწილი კონ-
ვერტერის სიღრმეში იჟანგება ნახშირორჟანგამდე $\{\text{CO}\}+0,5\{\text{O}_2+$
 $+3,762\text{N}_2\}=\{\text{CO}_2\}+\{1,881\text{N}_2\}$ რეაქციით, უმეტესი ნაწილი კი გამოდის
კონვერტერის ხახიდან, იჟანგება ჰაერზე და წარმოქმნის აღს.
ნახშირბადის ამოწვის ინტენსიურობის ზრდასთან ერთად 8—10
მეტრამდე იმატებს კონვერტერის ხახიდან ამომავალი აღის სიმაღ-
ლე, ხოლო მისი ღია ყვითელი ფერი თანდათანობით გადადის
თვალისმომჭრელ კაშკაშა თეთრში.

ნახშირჟანგის გამოყოფა იწვევს თხევადი ლითონის აბაზანის
ენერგიულ არეკას (ბარბორაჟს), თანდათან ძლიერდება ხმაური,
კონვერტერი იწყებს რეკვას (ვიბრაციას), თითქოს ადგილიდან
უნდაო მოწყვეტა. ეს ვიბრაცია გადაეცემა მთელ საამქროს. ნახშირ-
ბადის ძალზე ინტენსიურ ამოწვას ხშირად თან ახლავს კონვერ-
ტერიდან ლითონისა და წილის ამოტყორცნა. მეორე პერიოდში
კონვერტერიდან ამომავალი აირები ძირითადად შედგება ნახშირ-
ჟანგისა და ნახშირორჟანგისაგან, შედარებით მცირე რაოდენო-
ბითაა აზოტი და სრულებით არაა თავისუფალი ჟანგბადი. აირადი
ფაზის ნახშირბადის ჟანგულების მიხედვით გამოთვლილი
ჟანგბადის რაოდენობა საგრძნობლად აღემატება კონვერტერში
ჰაერით შეტანილი ჟანგბადის რაოდენობას. ეს იმაზე მეტყველებს,

რომ დნობის პირველ პერიოდში წიდაში დაგროვილი რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგები ნახშირბადის ამოწვაში შემდეგი რეაქციებით მონაწილეობს: $[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$; $[C] + (MnO) = \{CO\} + [Mn]$. ამ მოსაზრებას ადასტურებს მეორე პერიოდში წიდის შედგენილობის შემდეგი ცვლილება: მცირდება რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგების რაოდენობები, ხოლო იზრდება კაჟმიწის კონცენტრაცია.



სურ. 3.6 ლითონის ქიმიური შედგენილობისა და ტემპერატურის ცვლილება ბესემერის კონვერტერში დნობისას

ლითონის ტემპერატურა მეორე პერიოდში უმნიშვნელოდ იზრდება, ზოგჯერ კი შეიძლება შემცირდეს კიდეც. ლითონურ აბაზანაში ნახშირბადის კონცენტრაციის შემცირებასთან ერთად მცირდება მისი ამოწვის სიჩქარეც. კონვერტერიდან გამოყოფილი ალი სიმაღლეში მცირდება და ბოლოს ქრება კიდეც. ლითონის ტემპერატურისა და შედგენილობის ცვლილება წარმოდგენილია სურათზე 3.6.

მესამე პერიოდში მიმდინარეობს ლითონში დარჩენილი სილიციუმისა და მანგანუმის ამოწვა, რასაც თან ახლავს რკინის გაძლიერებული დაჟანგვა. კონვერტერის ყელი-

დან გამოიყოფა რკინისა და მანგანუმის ჟანგეულებით შეფერილი მურა ფერის კვამლი. ნახშირჟანგი უმნიშვნელო რაოდენობითაა გამოყოფილ აირებში, ახორტის კონცენტრაცია კი იზრდება. კვამლის გამოყოფისთანავე კონვერტერს „წააქცევენ“ და ფოლადს „გამოუშვებენ“. განჟანგვას და, თუ საჭიროა, დანახშირბადიანებას ატარებენ ციციხეში.

მესამე პერიოდის არსებობა არ არის აუცილებელი. იგი არ ტარდება, თუ თუჯში არ არის სილიციუმისა და მანგანუმის მაღალი საწყისი კონცენტრაცია. ეს პერიოდი არ ტარდება აგრეთვე საშუალო ან მაღალნახშირბადიანი ფოლადის გამოდნობისას „დაჭერის“ მეთოდით. ამ შემთხვევაში დნობას იმ დროს წყვეტენ მეორე პერიოდში, როდესაც ნახშირბადი სასურველი რაოდენობითაა ლითონში.

20-35 გ ტევადობის კონვერტერებში ღნობის ხანგრძლივობაა 10-20 წუთი. ამრიგად, კონვერტერის მწარმოებლურობა ძალზე მაღალია. კონვერტერში ფოლადის განუანგვას ატარებენ ფერო-მანგანუმის, ფეროსილიციუმისა და ალუმინის დამატებით, ხოლო დანახშირბადიანებას - კრიალა თუჯის, კოქსის, ანტრაციტის, გრაფიტის ან ხის ნახშირის საშუალებით.

კონვერტერის პროცესის შესწავლისას ყურადღებას იქცევს სამი ძირითადი მომენტი: 1) ლითონზე გაქრევის მოქმედების მექანიზმი; 2) პროცესის სითბური მხარე; 3) პროცესის ქიმიური რეაქციები და მათი თანამიმდევრობა.

3.1.4. ლითონზე გაქრევის მოქმედების მექანიზმი და ჰიდროდინამიკა

გაქრევის პროცესში კონვერტერში თხევადი ლითონის მოძრაობაზე დაკვირვება პრაქტიკულად ძალზე ძნელი განსახორციელებელია. ამის გამო ლითონზე გაქრევის მოქმედების მექანიზმის დასადგენად და გაქრევის ჰიდროდინამიკის შესასწავლად იყენებენ მოდელირების თეორიას. მოდელურად გამოიყენება გამჭვირვალე კონვერტერები, რომელთა ზომები, მსგავსების თეორიის გამოყენებით, თანაფარდობაშია რეალური კონვერტერის ზომებთან. სამოდელო სითხეებად შერჩეულია წყალი, სინდიყი, კასტორის ზეთი და გლიცერინი.

მოდელირების პირველი ცდები ჩაატარა ტრინკსმა 1917 წ. მინის მოდელში სინდიყზე. მოდელირების პარამეტრები შესაბამისობაში იყო რეალურ პირობებთან. მინის სამოდელო „კონვერტერში“ ჰაერი სხვადასხვა წნევით მიეწოდებოდა პაერმბერი მანქანიდან. ჰურტლიდან მიღში სინდიყის ნალერის თავიდან ასაცილებლად საკმარისი იყო ჰაერის შეყვანა 25-30 კპა (0,25-0,30 ატ)* ჭარბი წნევით**. მის მომატებასთან ერთად სინდიყი უფრო და უფრო ქუცმაკვდებოდა, რის გამოც იხრდებოდა მისი და ჰაერის საკონტაქტო სუდაპირი. როდესაც წნევამ მიაღწია 250 ჭარბ კპა-ს,

* რუდაქტორისაგან: $1 \text{ ატ} = 1,013 \times 10^5 \text{ ნმ}^2 \approx 9,81 \cdot 10^4 \text{ კპა} = 10^3 \text{ პა} = 0,1 \text{ მგპა}$ არის „ტექნიკური ატმოსფერო“ (1,კგ/სმ²).

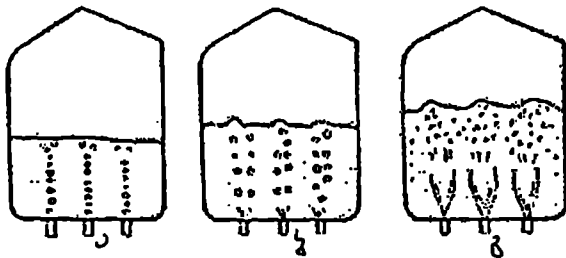
** რუდაქტორისაგან: ჭარბი წნევა მაშინ გვექნება, როდესაც შეყვანილი ჰაერის წნევა გადააჭარბებს ვერცხლისწყლის ან სხვა სითხის მშვიდი აბაზანის ძირზე მოქმედ წნევას. მაგალითად ვერცხლისწყლის ყოველი 735,5 მმ მიახლოებით 1 ატ ანუ 1 ტექნიკური ატმოსფეროს ტოლ წნევას ავითარებს ჰურტლის ფსკერზე. მას ემატება ატმოსფერული წნევა (დაეუშვათ 1 ატ), ე.ი. სულ 2 ატ.

იმდენად დიდი იყო სინდიეისა და ჰაერის კონტაქტი, რომ წარმოიქმნა სინდიეის ნისლი.

1931 წ. მაკეფერმა სამოდელო სითხედ გამოიყენა წყალი. ჰაერის ჭავლი საქშენიდან გამოსვლისას წარმოქმნიდა ჩირაღდანს, შემდეგ ცალკეულ ბუშტულებად იშლებოდა და სითხის ზედაპირზე ამოდებოდა. გაქრევის წნევის მომატებას აქაც ახლდა ბუშტულების დაწერილობა და ჰაერის სითხესთან საკონტაქტო ზედაპირის გაზრდა.

1934 წ. ე. კამენსკიმ თანამშრომლებთან ერთად სამოდელო სითხეებად გამოიყენა წყალი, სინდიეი, შაქრის ვაჟინი, თხევადი მინის ხსნარი და გლიცერინი. მოდელირებისას შეისწავლეს საქშენების რიცხვისა და მათი განაწილების, გაქრევის წნევის, საშქენების დახრის, კონვერტერის დახრისა და სხვა ფაქტორების გავლენა.

ვერტიკალურ კონვერტერში საქშენების ვერტიკალური განლაგებისას 2 კპა (0.02 ატ) ჰარბი წნევის დროს, რაც ოდნავ აღემატებოდა წყლის ძიდროსტატიკურ წნევას (წყნარი აბაზანის სიღრმე იყო 150–200 მმ), ჰაერი სითხეში გადის ცალკეული ბუშტულების სახით (სურ. 3. 7 ა). 10 კპა-მდე წნევის მომატებისას ბუშტულების ზომები იზრდება (სურ. 3. 7. ბ). საქშენიდან ჰაერის 10–50 კპა წნევით გამოსვლისას წარმოიქმნება ჭავლი, რომელიც



სურ. 3.7. სითხეში ჰაერის გახაწილების სქემა: ჰაერის წნევა P, კპა: ა- 2; ბ- 10; გ- 50 <math>P < 140</math>

წნევის 140 კპა-მდე მომატებასთან ერთად იზრდება და იღებს უფრო უწყვეტ სახეს (სურ. 3. 7 გ). მომატებული წნევისას ჭავლი იღებს კონუსის ფორმას, ბუშტულების რიცხვი იზრდება, ზომები კი მცირდება. ჭავლი-ჩირაღდანი კარგავს გამჭვირვალობას სითხის შეწოვის გამო, იზრდება შადრეენის სიმაღლე და გამოიტყორცნება ჭურჭლიდან. ვერტიკალურ სიბრტყეში ადგილი აქვს სითხის ცირკულაციას ზედა ნაწილში და საქშენებთან (სურ. 3. 8). გარდა ამისა, სითხე ბრუნავს ძირი'ხოვრტალურ სიბრტყეში საათის ისრის

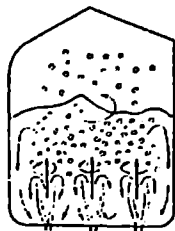
საწინააღმდეგოდ. აბაზანის ზედაპირი ირხევა. რხევათა ამპლიტუდების რეზონანსი იწვევს ძლიერ გამოშხვევებას. რხევათა ამპლიტუდა და სითხის ბრუნვის სიჩქარე იზრდება გაქრევის წნევის მომატებასთან ერთად. ამ გამოკვლევებით დაადგინეს, რომ ამოსროლების მექანიკური მიზეზია სითხის რხევათა რეზონანსი. საქმენების ნაწილის დახრით რეზონანსი ირღვევა, გაქრევა წინარად ტარდება უფრო მაღალ წნევებზეც კი.

ნატარდა აგრეთვე ორი ერთმანეთში შეერეული სითხის (წყლისა და ზეთის) ერთდროული გაქრევის მოდელირება, რაც წარმოადგენდა წიდა-ლითონის სისტემის გაქრევის იმიტაციას. კონვერტერის ვერტიკალურ მდგომარეობაში ყოფნისას წნევის გაზრდით იმატებდა ზეთის დაემულსიების ეფექტი. საქმენების ნაწილის დახრისას (ვერტიკალურ კონვერტერში) ზეთის დაემულსიების ეფექტი, წნევის მიუხედავად, მეტი იყო, ვიდრე წინა შემთხვევაში. კონვერტერის 45° -ით დახრისას ემულსიის რაოდენობა მკირდება (სურ. 3.9), რაც აიხსნება სითხის მიმართული ცირკულაციით.

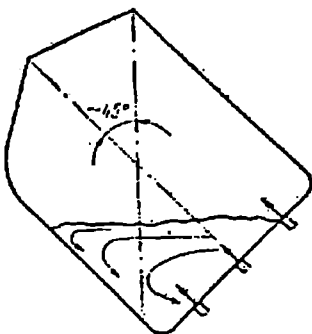
1934 წ. ბ. პინესმა ნაატარა ცდები შეფერადებულ სპირტზე. მისი შედეგები ე. კამენსკის შედეგების ანალოგიურია.

ბლანტი სითხეების - კასტორის ზეთისა და გლიცერინის გაქრევისას კონვერტერში აბაზანის ნორმალური პიდროდინამიკა დარღვეულია. პაერი გადის ბიძგებით, მსხვილი ბუშტულებით და წნევის გაზრდისას სითხე გამოიტყორცნება კონვერტერიდან. სითხის ცირკულაცია ირღვევა ან საერთოდ წყდება. პაერისა და სითხის კონტაქტი ძალზე მკირდება (სურ. 3.10).

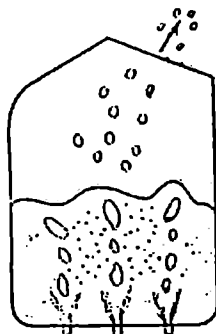
1939-1940 წლებში ი. კახანცვემა შეისწავლა თხევად გარემოში ზემოთკენ და



სურ. 3.8. სითხეზე გაქრევის მოქმედების სქემა ქვემოდან შებურვისას



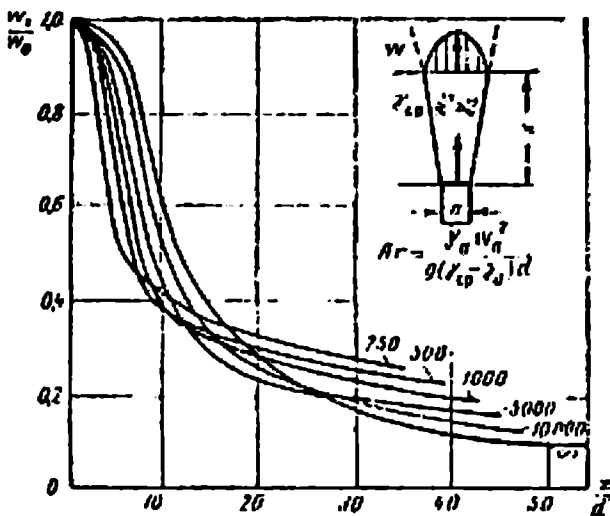
სურ. 3.9. სითხის ცირკულაცია დახრილ კონვერტერში გაქრევისას



სურ. 3.10. ბლანტი სითხეზე გაქრევის მოქმედების სქემა

ქვემოთკენ ჰაერის მოძრაობისას ჰაერის ჭაველის დერძული სინქარის შემცირების პარამეტრები და კანონები. აირი იყო არაასიმეტრიკული. სითხე - წყალი და სინდიოქი. დამოკიდებულებათა განსაზღვრა ხდებოდა უგანსომილებო კოორდინატებში

$\frac{W_x}{W_0} \leq 2$ და $\frac{x}{d}$. ჰაერის ჭაველის ვერტიკალურად ზემოთკენ მოძრაობისას მიღებულია მონაცემები (სურ. 3. 11).



სურ. 3.11. სითხეში ჩაძირული ჭაველის ვერტიკალურად მოძრაობის დერძული სინქარე არქიმედის კრიტერიუმთან (კიფრები მრუდებზე) დამოკიდებულებით

$$\frac{W_x}{W_0} = f\left(\frac{x}{d}, A_r\right),$$

სადაც, W_0 აირის საწყისი სინქარეა (საქმენში), მ/წმ;

W_x აირის ჭაველის დერძული სინქარეა სითხეში შესვლიდან x მანძილზე, მ/წმ;

d საქმენის დიამეტრია, მ;

A_r არქიმედის კრიტერიუმია.

$$A_r = \frac{\gamma_0 W_0^2}{g(\gamma_0 - \gamma_2) d}$$

სადაც γ_2 ჭაველის სიმკვრივეა;

γ_n - გარემოს სიმკვრივე.

კონვერტერში პაერის გაქრევისას $A_r \approx 250-1000$. როდესაც

$\frac{x}{d} > 40$, მაშინ $\frac{W_1}{W_0} \leq 0.2$ - ანუ ჭავლის ფარდობითი ენერგიაა

≈ 0.04 , ე.ი. შემაჯალ ენერგიაზე ბევრად უფრო მცირეა. აქედან

გამომდინარე, $\frac{x}{d} > 40$ პირობის დაკვირვებას კონვერტერიდან სითხის

წვეთების გამოტანა არ იქნება ინტენსიური.

აბაზანის გარკვეულ h სიღრმისას წვეთების გამოტანა მცირე

იქნება, როდესაც $\frac{h}{d} > 40$ ანუ $d < \frac{h}{40}$. სინამდვილეში, როდესაც

$d=10$ მმ და $h=400-500$ მმ გაქრევა მიმდინარეობს წყნარად, გამოტყორცნების გარეშე, მაგრამ 10-12 მმ-ზე ნაკლები დიამეტრის საქმენის დამზადება ძნელია.

3.1.5. ბესემერის პროცესის სითბური მხარე

ბესემერის პროცესი მიმდინარეობს სათბობის გამოყენების გარეშე. ბესემერის კონვერტერში ასხამენ 1250-1350 °C ტემპერატურამდე გახურებულ თხევად თუჯს. მისა ფოლადს გამოშვებისა და წამოსხმისათვის კი უნდა აქონდეს 1600-1650 °C ტემპერატურა. დნობისას ლითონის ტემპერატურა იზრდება 300-400 გრადუსით და ეს ხდება ძირითადად თუჯის მინარეუების ამოწვის ეგზოთერმული რეაქციების შედეგად გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე. პროცესის სითბურ ბალანსზე გავლენას ახდენს აგრეთვე თუჯის ფიზიკური სითბო ანუ მისი გახურების ხარისხი და კონვერტერის ამონაგის ტემპერატურა. ამრიგად ბესემერის პროცესის სითბურ ბალანსში გადამწვევტი მნიშვნელობა აქვს თუჯის ქიმიურ და ფიზიკურ სითბოს ამონაგის ტემპერატურასთან ერთად.

ქიმიური სითბოს რაოდენობას ძირითადად განსაზღვრავს თუჯში სილიციუმის კონცენტრაცია, ხოლო დანარჩენი ელემენტების გავლენა შედარებით უმნიშვნელოა. ამაში ადვილად გვარწმუნებს ცხრილი 3.1, რომელშიც წარმოდგენილია პაერით ელემენტების დაჟანგვის რეაქციების სითბური ეფექტები 1 კგ ამომწვარ ელემენტზე გადათვლით.

ამ ცხრილის მონაცემების მიხედვით ყველაზე დიდი რაოდენობით სითბო გამოიყოფა კაჟმიწისა და ნახშირორქანგის წარმო-

ლითონის ტემპერატურის მატება 1 % ელემენტის დაჟანგვის შედეგად °C

ელემენტი	ლითონის ტემპერატურა, °C		
	1200	1400	1600
Si+(O ₂ +3.762N ₂)	188	179	170
Mn+0.5(O ₂ +3.762N ₂)	55	53	51
Fe+0.5(O ₂ +3.762N ₂)	34	27	26
C +0.5(O ₂ +3.762N ₂)	59	48	39
C+(O ₂ +3.762N ₂)	198	174	158

ანგარიში ჩატარებულია 100 კგ თუჯზე შემდეგი პირობებისათვის: t=1300 °C ტემპერატურის მქონე თუჯი შეიცავს (მასურ %-ებში) 3,8 ნახშირბადს (C); 1,50 სილიციუმს (Si); 1,00 მანგანუმს (Mn); 0,08 ფოსფორს (P) და 0,06 გოგირდს (S). 1650 °C ტემპერატურამდე გახურებულ ფოლადში განჟანგვის წინ უნდა იყოს (მასურ %-ებში) 0,08 ნახშირბადი, სილიციუმი და მანგანუმი – ევალი, 0,08 ფოსფორი და 0,06 გოგირდი. შებერილი ჰაერის ტემპერატურაა 50 °C, გამომავალი აირებისა – 1500 °C.

ქმნისას. აქედან ცხადი ხდება, რომ ბესემერის პროცესის სითბურ ბალანსში შედარებით უმნიშვნელო წვლილი შეაქვს ნახშირბადს, ვინაიდან იგი კონვერტერში მხოლოდ მონოოქსიდამდე იჟანგება. ასევე უმნიშვნელოა მანგანუმის და რკინის დაჟანგვის შედეგად გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა.

უფრო ნათელ წარმოდგენას ბესემერის პროცესის სითბურ ბალანსში ელემენტების როლის შესახებ გვაძლევს ცხრილი 3.2.

თუჯის მინარეების ამოწვის სითბური ეფექტები

რეაქცია	სითბური ეფექტი, კჯ				
	ერთ მოლზე	1 კგ ამომწვარ ელემენტზე სხვადასხვა ტემპერატურაზე, °C			
		25	1200	1400	1600
Si+O ₂ +3.762N ₂ =SiO ₂ +3.762N ₂	864414	30836	21590	20500	19040
Mn+0.5O ₂ +1.881N ₂ =MnO+1.881N ₂	387020	7030	6025	6010	5710
Fe+0.5O ₂ +1.881N ₂ =FeO+1.881N ₂	269868	4810	4020	3140	2930
C+0.5O ₂ +1.881N ₂ =CO+1.881N ₂	110458	9160	6778	5520	4350
C+O ₂ +3.762N ₂ =CO ₂ +3.762N ₂	393505	32845	22675	19957	17655

შენიშვნა: სითბური ეფექტები გამოთვლილია მყარ მდგომარეობაში მყოფი ელემენტების დაჟანგვისას

ამ ცხრილებიდან ვხედავთ, რომ ბესემერის პროცესის სითბურ ბალანსში ძირითადი მნიშვნელობა აქვს სილიციუმს. მისი

რაოდენობის მიხედვით საბესემერე თუჯები დაყოფილია სამი ჯგუფად:

- 1) ქიმიურად ცივი თუჯი 0,8–1,2% Si;
- 2) ქიმიურად ნორმალური თუჯი 1,25–1,75% Si;
- 3) ქიმიურად ცხელი თუჯი 1,75–2,25% Si და მეტი.

თუჯის გახურების ხარისხის მიხედვითაც გვაქვს სამი ჯგუფი:

- 1) ფიზიკურად ცივი თუჯი 1280 °C ნაკლები;
- 2) ფიზიკურად ნორმალური თუჯი 1280–1350 °C;
- 3) ფიზიკურად ცხელი თუჯი 1350 °C და მეტი.

ბესემერის პროცესის სითბურ ბალანსში დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე კონვერტერის ამონაგით აკუმულირებულ სითბოს რაოდენობას. კონვერტერის 900 °C და 1500 °C ტემპერატურებამდე გახურებული ამონაგის მიერ აკუმულირებულ სითბოს რაოდენობათა შორის სხვაობაა 9160 კჯ. სითბოს დაახლოებით იგივე რაოდენობა შეაქვს კონვერტერში თუჯიდან 0,45 % სილიციუმის ამოწვას ან თუჯის გადახურებას 100 °C-ით. ამრიგად, ბესემერის პროცესში სითბოს მესამე წიაროს წარმოადგენს კონვერტერის ამონაგის ტემპერატურა.

ბესემერის პროცესი ტარდება მუავე ამონაგიან კონვერტერში, ამის გამო დნობის დროს შეუძლებელია ფოსფორისა და გოგირდის მოშორება. მათი მოშორებისთვის საჭიროა კირის შეტანა აბაზანაში. ეს კი გამოიწვევს კონვერტერის ამონაგის ცვეთას. ამიტომ თუჯი არ უნდა შეიცავდეს ამ ელემენტებს დასაშვებზე მეტი რაოდენობით (0,07 % P და 0,05 % S). დაბალფოსფორიანი ფოლადების მისაღებად გამოიყენება მცირეფოსფორიანი საბესემერე თუჯები. რაც შეეხება გოგირდს, მისი რაოდენობა დამოკიდებულია თუჯში სილიციუმის კონცენტრაციაზე. მაღალსილიციუმის თუჯის გამოდნობა მხოლოდ „ცხლად“ მომუშავე ბრძმელშია შესაძლებელი. ეს საშუალებას გვაძლევს ბრძმელის პროცესი ჩავატაროთ მაღალფოქიან წიღებზე, რომლის დროსაც წარმატებით ხორციელდება განგოგირდება ანუ გოგირდის მოშორება. ამავე დროს თუჯი იქნება ფიზიკურად ცხელიც. მაგრამ უნდა გაეთვალისწინოთ რომ ბრძმელის „ცხლად“ მუშაობისას დიდია დეფიციტური კოქსის ხარჯი. ამიტომ ბესემერის პროცესის ჩატარება ეკონომიკური თვალსაზრისით მიზანშეწონილია ქიმიურად და ფიზიკურად ნორმალურ თუჯზე.

3.1.6. ბესემერის პროცესის ვარიანტები

ბესემერის პროცესი მისი აღმოცენებისთანავე ფართოდ გავრცელდა მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში. ამ ქვეყნებში ბესემერის პროცესისათვის იყენებდნენ სხვადასხვა შედგენილობისა და ტემპერატურის თუჯებს. ამის შედეგად ჩამოყალიბდა ბესემერის პროცესის შემდეგი ვარიანტები:

- 1) ინგლისური;
- 2) გერმანული;
- 3) რუსული;
- 4) შვედური;
- 5) ამერიკული.

მონაცემები ამ ქვეყნებში გამოყენებული თუჯის შედგენილობის, ტემპერატურისა და კონვერტერის ამონაგის მდგომარეობის შესახებ მოყვანილია ცხრილში 3.3.

ცხრილი 3.3

ბესემერის პროცესის ვარიანტები

პროცესის ტიპი	ქიმიური შედგენილობა, %		ტემპერატურა, °C	
	Si	Mn	თუჯის	ამონაგის
ინგლისური	2,0–2,5	0,5	1250	800–1000
გერმანული	2,0–2,5	1,5–2,5	1400–1450	800–1000
რუსული	0,8	1,5	1400–1450	800–1000
შვედური	0,8–1,0	–	1200–1250	800–1000
ამერიკული	0,8–1,0	0,5	1250–1300	~1500

ინგლისური პროცესი ტარდება ძალზე „ცხლად“ და ლითონის ნორმალური ტემპერატურის მისაღებად კონვერტერში შეიქმნება გამაცივებელი დანამატები რელსების წამონაჭრების ან სხვა ჯართის სახით.

გერმანიაში ქიმიურად ცხელ თუჯს დამატებით ახურებდნენ აღქმედ ღუმელში. ნახშირბადი ამოწვას იწვებდა დნობის პირველსავე მომენტიდან, ხოლო მეორე პერიოდში მისი ამოწვა წინ უსწრებდა სილიციუმისა და მანგანუმის ამოწვას. ამის შედეგად ნახშირბადის საჭირო რაოდენობის მიღების შემთხვევაში ლითონში რჩებოდა ამოუწვავი სილიციუმი და მანგანუმი. მათ შემდეგ იმ დაუჩანგვას თან ახლდა რკინის გაძლიერებული ამოწვა. ლითონი მიიღებოდა ზედმეტად დაუჩანგული და აირებით მდიდარი.

რუსეთში 1872 წ. დ. ნერნოემა ობუხოვის ქარხანაში და მისგან დამოუკიდებლად კ. პოდენოემა ნიჟნი-საღდის ქარხანაში ქიმიურად ცივი თუჯი წინასწარ გაახურეს 1400–1450 °C-მდე. გერმანული

ვარიანტის მსგავსად აქაც არ იყო მკაფიოდ გამოხატული პირველი პერიოდი, მაგრამ ვინაიდან თუჯში სილიციუმის კონცენტრაცია არ იყო მაღალი, იგი მთლიანად ასწრებდა ამოწვას. დნობის ამ ვარიანტში გათვალისწინებული იყო სითბური ბალანსის ორი წყაროს ურთიერთკავშირი.

შედეგთში ბესემერის კონვერტერში იყენებდნენ ხის ნახშირზე მომუშავე ბრძიმედში გამოდნობილ ქიმიურად ცივ თუჯს. დნობის ნორმალურად ჩატარებისათვის მიმართავენ სხვადასხვა ხერხებს:

1) ბრძიმედის აირით კონვერტერის ამონაგის გახურება;

2) კონვერტერის რხევა დნობის დასაწყისში ნახშირბადის მონოოქსიდის კონვერტერის სიღრუეშივე დიოქსიდამდე დასაწვავად;

3) კონვერტერის ხახის ექსცენტრული განლაგება და კონვერტერის მოცულობის გაზრდა ამოტყორცვებით ლითონის დანაკარგის შესამცირებლად.

ამერიკულ საამქროებში ბესემერის კონვერტერების მუშაობა სანიმუშოდ იყო ორგანიზებული. დნობათა შორის შემცირებული პაუზების წყალობით თუჯს ასხამდნენ მაღალი ტემპერატურის მქონე ამონაგის კონვერტერში. პირველ პერიოდში ინტენსიურად იჟანგებოდა სილიციუმი და მანგანუმი, ლითონი ხურდებოდა და იწყებოდა ნახშირბადის გაძლიერებული ამოწვა. დნობა მთავრდებოდა სწრაფად.

3.1.7. მცირე ბესემერება

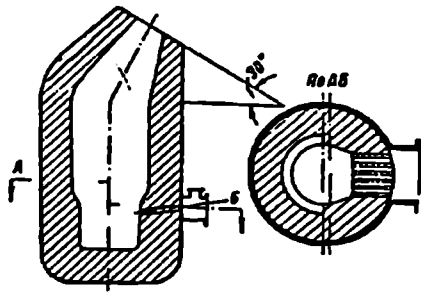
მეტალურგიული წარმოების განვითარებასთან ერთად საჭირო გახდა ისეთი აგრეგატის შექმნა, სადაც შესაძლებელი იქნებოდა მაღალტემპერატურის მქონე თხევადდენადი ფოლადის მცირე რაოდენობით მიღება თხელკედლიანი ფასონური დეტალების ჩამოსასხმელად. ჩვეულებრივად ქვემოდან შებერვით მომუშავე ბესემერის კონვერტერში შეუძლებელი იყო ასეთი ფოლადის გამოდნობა. გადასამუშავებელი თუჯის მასის შემცირებასთან ერთად საგრძნობლად იზრდებოდა 1 ტ ლითონზე სითბოს ხვედრითი დანაკარგები გამოსხივებასა და ამონაგის გახურებაზე, რის შედეგადაც ფოლადის ტემპერატურა არ იყო საკმარისი ფასონური სხმულების ჩამოსასხმელად.

ქვემოდან შებერვით მომუშავე ბესემერის კონვერტერში გამოიყენებოდა ნახშირბადის სრული წვის სითბოს მხოლოდ 20–30 %, ვინაიდან იგი იჟანგებოდა მონოოქსიდამდე შედარებით ნაკლები

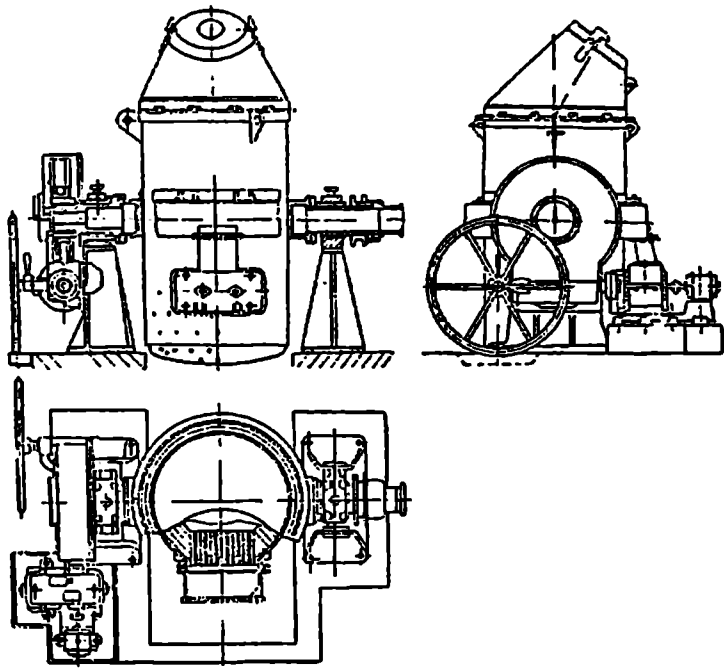
ეკსოთერმული ეფექტით და არა დიოქსიდამდე. ეს იმით აიხსნება, რომ კონვერტერის სიღრუეში აირად ფაზაში არ იყო თავისუფალი ჟანგბადი, რომელიც შეძლებდა ნახშირბადის მონოოქსიდის დიოქსიდად დაქანგვას და სითბოს დამატებითი წყაროს შექმნას. აღნიშნულის გათვალისწინებით მცირე ბესემერების პროცესის გამომგონებლებმა პირველ რიგში შეცვალეს კონვერტერში ჰაერის შეყვანის ადგილი – დაიწყეს მისი მიწოდება ლითონის ზედაპირზე. გადაწყვეტილი იყო ჰაერის გვერდითი შებერვის მოწყობა. მცირე ბესემერების სამშობლოა შვედეთი, სადაც ეს ხერხი პირველად განხორციელდა 1879 წ. შემდგომ მცირე ბესემერებმა გავრცელება პოვა ინგლისში, საფრანგეთში, აშშ-ში, რუსეთსა და სხვა ქვეყნებში. მცირე ბესემერების კონვერტერი ბესემერის ჩვეულებრივი კონვერტერისაგან განსხვავდება ჰაერის შეყვანის ადგილით. ჰაერის მიწოდება ხდება გვერდიდან, კონვერტერი ყრუფსკერიანია (სურ. 3.12). დანარჩენი პარამეტრებით იგი დიდად არ განსხვავდება დიდი კონვერტერისაგან. მისი ამონაგი შესაძლებელია იყოს როგორც მჟავე, ისე – ფუძე, მაგრამ უპირატესად გამოიყენება პირველი.

მცირე ბესემერების პროცესში გამოიყენება ბოეში გამოდნობილი თუჯი. ბოვიდან გამოშვებული თუჯის ტემპერატურა იცვლება 1440–1470 °C-ის ფარგლებში, ხოლო რეტორტაში ჩასხმისასაა 1400–1450 °C. კონვერტერის ამონაგის ტემპერატურა უნდა იყოს 1350–1500 °C-ის ფარგლებში. ბოეში გამოდნობისას თუჯში კოქსიდან გადადის გოგირდის გარკვეული რაოდენობა. ამის გამო საჭიროა ციცხეში თუჯის დესულფურაციის ჩატარება და გოგირდის რაოდენობის დაყვანა 0,04 %-მდე. დნობის ნორმალურად ჩატარებისათვის საჭიროა თუჯის ქიმიურ და ფიზიკურ სითბოთა შორის კაეშირის გათვალისწინება. ახალ აუწიდავ ცივ კონვერტერში დნობის ჩატარებისას ტემპერატურის გაზრდის მიზნით პირველი პერიოდის ბოლოს რეტორტაში ამატებენ 45 %-იან ფეროსილიციუმს 6–10. კგ ნატეხების სახით.

წინასწარ კარგად გახურებულ კონვერტერს შემოაბრუნებენ ვერტიკალური ღერძის მიმართ 40–60°-ით და ციცხვიდან ჩაასხამენ თუჯს. შემდეგ კონვერტერს შემოაბრუნებენ ისე, რომ ლითონის ზედაპირი გაუთანაბრდეს საქშენების დონეს ან რამდენიმე სანტიმეტრით დაბლა იყოს. ეს შეესაბამება ვერტიკალური ღერძის მიმართ დაახლოებით 15–20°-ით დახრას. ერთდროულად იწყებენ გაქრევას. ოპერაციის დასაწყისში გაქრევის წნევაა 25–35 კპა (0,25–0,35 ატ). მინარევების ამოწვის თანამიმდევრობა ბესემერის პროცესის ანალოგიურია. დნობის დასაწყისში იჟანგება სილიცი-



(ა)



(ბ)

სურ. 3.12. 2,5 ტ მცირე ბესუმერის კონვერტერის ჭრილი (ა) და საერთო განლაგება (ბ).

უმი, მანგანიუმი და რკინა. გაქრევის ზედაპირული მიწოდების წყალობით კონვერტერის სამუშაო სივრცეში ჟანგბადის სიჭარბე იწვევს რკინის გაძლიერებულ ჟანგვას და რკინის ქვეყანგის კონცენტრაცია წიდაში აღწევს 40 %. ლითონის ტემპერატურის გაზრდასთან ერთად იწვება ნახშირბადის ამოწვა შებერვით შეტანილი ჟანგბადით და წიდაში მყოფი რკინის ქვეყანგით. აბაზანის არევის ინტენსიურობა ნაკლებია და ლითონის ამოტყორცნებს აღგილი არა აქვს.

კონვერტერიდან გამოყოფილ აირებში იზრდება ნახშირბადის მონოოქსიდის წილი, ვინაიდან რეტორტაში აღარ რჩება თავისუფალი ჟანგბადი მის დასაწვავად. კონვერტერიდან გამოშავალ აირებში მყოფი ნახშირბადის მონოოქსიდი იწვის და აღის სიმალლე იზრდება. მაგრამ ეს დიდხანს არ გრძელდება, რადგანაც სითბოს დამატებითი წყაროს დაკარგვის და წილის რკინის ქვეყანგით ნახშირბადის ენდოთერმული ეფექტით წვის შედეგად მცირდება აბაზანის ტემპერატურა და ნახშირბადის ამოწვის სინქარე. ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად ძლიერდება აბაზანაში დარჩენილი სილიციუმის ამოწვა, რაც იწვევს ტემპერატურის მომატებას. ამასთან ერთად ძლიერდება ნახშირბადის ამოწვა და კონვერტერის თავზე განქეორებით იწვებს ამოსვლას აღი. ნახშირბადის ამოწვის დასასრულს აღი გაქრება და რკინის წვის შედეგად დაიწება მურა ფერის კვამლის გამოყოფა კონვერტერიდან.

მცირე ბესემერების კონვერტერები მზადდება 1,5–2,5 ტ ტევადობით. დნობა გრძელდება 13–18 წთ. მცირე ბესემერებით გამოდნობილი ფოლადი ხარისხით უახლოვდება მარტენისა და ელექტრორკალურ დუმელებში მიღებულს, რაც ძირითადად აიხსნება აზოტის დაბალი შემცველობით (0,004–0,010 %). გვერდითი შებერვის დროს კაერი ურთიერთქმედებს მხოლოდ ლითონის ზედაპირთან და მას არ უწევს აბაზანის მთელ სიღრმეზე გადაადგილება, რასაც აღგილი აქვს ქვემოდან შებერვით მომუშავე ბესემერის კონვერტერში.

3.1.8. თომასის პროცესი

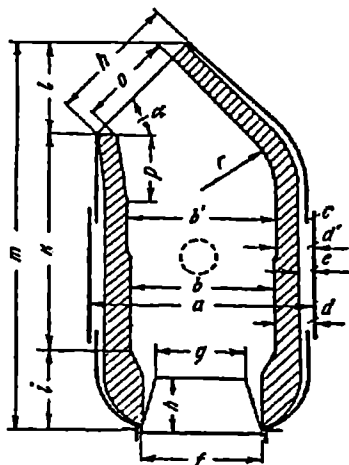
ბესემერის პროცესით შეუძლებელია ლითონიდან ფოსფორისა და გოგირდის მოშორება. ამან საგონებელში ნააგდო ისეთი ქვეყნები, სადაც მოეპოვებოდათ ფოსფორით მდიდარი რკინის მადნები და შესაბამისად მათგან გამოდნობილი თუჯი მაღალ-

ფოსფორიანი იყო. ამიტომ ბესემერის პროცესის აღმოკვეთებასთან ერთად დაიწყო მუშაობა მაღალფოსფორიანი თუჯის კონვერტერში გადაამუშავების ტექნოლოგიის შესამუშავებლად. პირველსავე ცდებზე დადგინდა, რომ საჭირო იყო კონვერტერის მუშაე ამონაგის შექცევა. არ გამოდგა ამ მიზნით რკინის მადნიანი ამონაგის დამზადება. ასეთ ამონაგთან ურთიერთქმედებაში შედიოდა სილიციუმის დაუანგვის შედეგად წარმოქმნილი კაჟმიწა და იწვევდა მის ცვეთას. საჭირო იყო ფუძე ჟანგეულების შემცველი უფრო მაღალი ცვეხლგამძლეობის მქონე მასალა, რომელიც აქტიურად იმოქმედებდა ფოსფორის დაუანგვის პროდუქტთან (P_2O_5 -თან).

ამ მიმართულებით მუშაობაში წარმატებას მიაღწია ინგლისელმა სიდნეი თომასმა (1850–1885 წწ.), მან 1877 წ. 2,7 კგ ტვეადობის ლაბორატორიული კონვერტერი ამოაგო კირისა და თხევადი მინის ნარევეთ. შემდგომში თომასმა გამოცადა მრავალი ფუძე მასალა სხვადასხვა შემკერვლით და ბოლოს შენერდა ბოლომდე გამომწვარი დოლომიტისა და უწყლო ქვანახშირის ფისის ნარევედუფოსფორაციის დაქარების მიზნით კონვერტერში ამატებდა კირს.

კონსტრუქციულად თომასის კონვერტერი არ განსხვავდება ბესემერის კონვერტერისაგან (სურ. 3. 13) და ერთნაირი ტვეადობის პირობებში მხოლოდ სომითაა უფრო მეტი, რაც დაკავშირებულია წიდის უფრო მეტ რაოდენობასთან და კლითონის უფრო ძლიერ ამოსრულებთან. კონვერტერის ის ნაწილი, რომელიც განიცდის გაძლიერებულ მექანიკურ ცვეთას თუჯის ნახსმის და ფოლადის გამომეების დროს, მზადდება შამოტის აგურისაგან.

თომასის პროცესი ძალზე სწრაფად განვითარდა გერმანიაში, საყრანგეთში, ბელგიასა და ლუქსემბურგში, სადაც უხვად მოიპოვებოდა ფოსფორიანი რკინის მადნები. რუსეთში თომასის პროცესი გამოყენებული იყო 1895 წ. ტაგანროგის, ქერნისა და მარიუპოლის ქარხნებში. იქ თუჯს აღნობდნენ ქერნში მოპოვებული ფოსფორიანი რკინის მადნებიდან. 1963 წ. თომასის ხერხით გამოდნობილი ფოლადის წილი იყო მისი მთელი რაოდენობის 39 % უფრ-ში, 56 % -



სურ. 3.13. თომასის კონვერტერის სქემა

საფრანგეთში, 87 % – ბელგიაში და 95 % – ლუქსემბურგში. ამის შემდეგ თომასის პროცესმა ადგილი დაუთმო უფრო პროგრესულ ხერხს – ჟანგბად-კონვერტერულ პროცესს.

3.1.9. თომასის პროცესის ტექნოლოგია

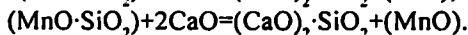
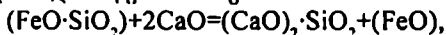
თომასის პროცესის ძირითად საწყის მასალას წარმოადგენს მაღალფოსფორიანი თუჯი (1,6–2,0 % P). ამასთან ერთად თუჯი უნდა შეიცავდეს არა უმეტეს 0,6 % Si; 1,3 % Mn და 0,07 % S. დეფოსფორაციის წარმატებით ჩატარებისათვის გამოიყენება კირი 90–92 % CaO-ს შემცველობით. გამაცივებელი დანამატების სახით გამოიყენება რკინის მადანი, რკინის ხენჯი, ფოლადის ჯართი ან რკინის ხენჯისა და კირისაგან დამზადებული ბრიკეტები.

დნობის პროცესი შედგება სამი პერიოდისაგან:

- 1) ნაპერწკლის ანუ წიდის წარმოქმნის პერიოდი;
- 2) ალის ანუ ნახშირბადის დაჟანგვის პერიოდი;
- 3) კვამლის ანუ სუდმეტი ბერვის პერიოდი.

წინასწარ გახურებულ „წაქცეულ“ კონვერტერში ჩატვირთავენ თუჯის მასის 12–18 % კირს, ჩაასხამენ 1050–1100 °C* ტემპერატურის მქონე თუჯს. ამის შემდეგ იწყებენ ჰაერის შებერვას 0,2–0,26 მგ/ა წნევით და კონვერტერი გადაჰყავთ ვერტიკალურ მდგომარეობაში. გაქრევა ტარდება 220–230 მწმ სიჩქარით (ნორმალურ პირობებში) და ჰაერის ხარჯი შეადგენს 300–350 მ³/ტ იმისდა მიხედვით, თუ რა შედგენილობისაა თუჯი.

პირველ პერიოდში ბესემერის პროცესის მსგავსად იჟანგება სილიციუმი, მანგანუმი და რკინა. მათი დაჟანგვის პროდუქტები წარმოქმნის თხევად სილიკატებს (FeO·SiO₂ და MnO·SiO₂), რომლებიც ფარავს კირის ნატეხებს. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, რასაც იწყებს სილიციუმის დაჟანგვა, კირი რეაქციაში შედის პირველად სილიკატურ წიდასთან და თანდათანობით იხსნება მასში, თუმცა ეს პროცესი საბოლოოდ მთავრდება მხოლოდ მესამე პერიოდის დასაწყისისათვის.



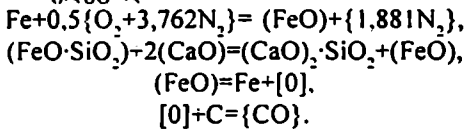
პირველ პერიოდში ხშირია აფეთქებები და გამოტყორცნები კონვერტერიდან, რასაც იწყებს კირისა და მადნის ტენის აორთქ-

* ფოსფორის მაღალი კონცენტრაციის წყალობით სათომასე თუჯის დნობის ტემპერატურა საგრძნობლად ნაკლებია საბესემერე თუჯისაზე.

ლუბა. პირველ პერიოდში კონვერტერის ხახიდან გამოიყოფა აირების მიერ გამოტანილი კირის ნაწილაკებისგან ოდნავ წითლად ან ყვითლად შეფერილი გამჭვირვალე ალი.

თუჯში სილიციუმის მცირე რაოდენობის გამო ლითონის ტემპერატურა არ იზრდება ისე ძლიერად, როგორც ბესემერის პროცესში, ხოგჯერ კი მცირდება კიდევ, რადგან სითბოს დიდი რაოდენობა იხარჯება ცივი კირის გახურებასუ. პირველ პერიოდში აირებს აგრეთვე თან გამოაქვს კონვერტერიდან თუჯის წვეთები და მათი გახლეჩის შედეგად წარმოიქმნება ნაპერწკლები. კონვერტერიდან გამოსულ აირებში 70-78 % აზოტია.

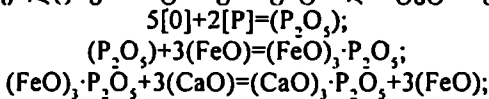
სილიციუმისა და მანგანუმის კონცენტრაციის შემცირებასთან ერთად იწყება ნახშირბადის ამოწვა (აღის პერიოდი). კონვერტერის ხახიდან გამოდის ნათელი ალი, რომლის სიმაღლე და სიკაშკაშე თანდათანობით მატულობს ნახშირბადის ამოწვის სინქარის ზრდასთან ერთად, თუმცა სიკაშკაშით ის ბევრად ჩამოუვარდება ბესემერის პროცესის ალს, ვინაიდან თომასის პროცესის მეორე პერიოდის დასაწყისში ლითონის ტემპერატურა უფრო დაბალია, ვიდრე ბესემერის კონვერტერში. მეორე პერიოდში ნახშირბადი იჟანგება როგორც შენაბერი ქაერით, ისე რკინის ქვეყანგით, რომელიც მიიღება ქაერით რკინის დაჟანგვისა და წიდიდან გამოთავისუფლების შედეგად.

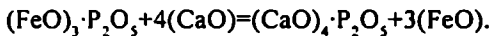


კონვერტერიდან მეორე პერიოდში გამოყოფილ აირებშია 30-38 % ნახშირქანგი, დაახლოებით 50 % აზოტი და 5-7 % ნახშირორჟანგი.

მეორე პერიოდის ბოლოს მცირდება ნახშირბადის ამოწვის სინქარე, გამოყოფილი ნახშირქანგის რაოდენობა და კონვერტერიდან გამოსულ აირებში 80-95 %-მდე იზრდება აზოტის წილი. აღის სიმაღლე და სიკაშკაშე მცირდება და ბოლოს საერთოდ ქრება. იწყება მესამე პერიოდი.

მესამე პერიოდში იწყება ფოსფორის დაჟანგვა. დაჟანგვის შედეგად მიღებული ფოსფორის ანჰიდრიდი ურთიერთქმედებს წიდაში მყოფ კალციუმის ქანგთან და წარმოიქმნება მტკიცე ნაერთები - კალციუმის ტრიფოსფატი და ტეტრაფოსფატი:





თომასის პროცესში დეფოსფორაციას ხელს უწყობს ფუძე ამონაგი და კირიანი ფუძე წიდა. ამით აიხსნება დეფოსფორაციის დაწყება მესამე პერიოდში, როდესაც კირი მთლიანად ასწრებს წიდაში გახსნას და მისი ფუძიანობის გაზრდას. მესამე პერიოდში ფოსფორთან ერთად იქანგება რკინაც. კონვერტერიდან გამოდის მკრთალი მოწითალო ალი, რომელიც შეფერილია რკინის ჟანგის მურა კვამლით. რკინის ზედმეტად დაჟანგვის თავიდან აცილების მიზნით ფოსფორს დაიყვანენ გამოსადნობ ფოლადში დასაშვებზე (კოტათი უფრო მცირე კონცენტრაციამდე. თომასის კონვერტერში შეუძლებელია „დაჭერის“ მეთოდით მუშაობა, ვინაიდან დეფოსფორაცია მხოლოდ მესამე პერიოდშია შესაძლებელი. ფოსფორის დაჟანგვა ეგზოთერმული რეაქციაა და მისი ამოწვა ხელს უწყობს ლითონის ტემპერატურის გაზრდას.

ამრიგად, თომასის პროცესში ლითონის ტემპერატურის გაზრდა ეგზოთერმული რეაქციების ხარჯზე ორჯერ ხდება: ნაკლებად – პირველ პერიოდში და საგრძნობლად – მესამე პერიოდში. მებურვის პროცესში ლითონის ტემპერატურის ცვლილება მოყვანილია 3.4 ცხრილში.

ცხრილი 3.4

ლითონის ტემპერატურის ზრდა 1 % ელემენტის დაჟანგვისა და აწიღვისას

რეაქცია	რეაქციის ტემპერატურა, °C		
	1200	1400	1600
$2P+2,5(O_2+3,762N_2)+4CaO$	155	136	117
$Si+(O_2+3,762N_2)+2CaO$	137	119	101
$Mn+0,5(O_2+3,762N_2)$	34	32	29
$Fe+0,5(O_2+3,762N_2)$	22	20	18
$C+0,5(O_2+3,762N_2)$	22	14	6
$C+(O_2+3,762N_2)$	127	108	89

ანგარიში ნატარებულია 100 კგ თუჯზე შემდეგ პირობებში:
 თუჯი: 3,25 % C; 0,5 % Si; 1,25 % Mn; 2,00 % P და 0,10 % S.
 ლითონი გაქრევის ბოლოს: 0,05 % C; Si – კვალი; 0,10 % Mn;
 0,06 % P და 0,06 % S.

ღრობის დამთავრებისას კონვერტერს დახრიან და წიდას საწიდე ფიალაში გადაღვრიან. ამის შემდეგ ფოლადს განჟანგავენ და ისევე დაანახშირბადიანებენ, როგორც ბესემერის პროცესში. წიდის მოხდა განჟანგვის წინ გამართლებულია იმით, რომ განმჟანგველების შეტანამ არ გამოიწვიოს წიდიდან ფოსფორის აღდგენა და ლითონში დაბრუნება.

თომასის პროცესში გოგირდის მოცილება უმნიშვნელო რაოდენობითაა შესაძლებელი (მთელი რაოდენობის 15–20 %), ვინაიდან დესულფურაციის წარმატებით ჩატარებისათვის, მაღალი ფუძიანობის გარდა, საჭიროა აგრეთვე აღმდგენელი გარემო ანუ რკინის ქვეჟანგის დაბალი რაოდენობა წიდაში. თომასის პროცესი კი მკვეთრად გამოხატული დაჟანგვითი პროცესია და რკინის ქვეჟანგის წილი წიდაში აღწევს 12–17 %-ს. ამის გამო ცდილობენ საწყის თუჯში გოგირდი არ იყოს 0,06–0,07 %-ზე მეტი.

მესამე პერიოდში საგრძნობლად იზრდება აზოტის შემცველობა ლითონში.

თომასის პროცესში მიღებული წიდა შეიცავს 16–22 % P_2O_5 -ს. ის შესანიშნავი სასუქია სოფლის მეურნეობისათვის. ნიადაგში სასუქი ადვილად გაიხსნება. თუ ეს წიდა SiO_2 -ის 4–8 %-ს შეიცავს.

3.1.10. კონვერტერული პროცესი რკინის მადნისა და კირქვის გამოყენებით

პროცესის ძალზე ცხელი სელის გამოსასწორებლად თუჯის ჩასხმის წინ კონვერტერში ჩატვირთავენ რკინის მადანს. ეს გამაცივებელი დანამატი იმავდროულად ხელს უწყობს აზოტის დაბალი შემცველობის ფოლადის მიღებას. მართლაც, კონვერტერში დამატებითი დამჟანგველის შეყვანა საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ შებერვის ხარჯი და გაეზარდოს თუჯის მინარეუების ამოწვა. მაგალითად, 10 ტონიან კონვერტერში 4 % მადნის შეყვანა საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ დნობის ხანგრძლივობა 30 %-ით და აზოტის რაოდენობა ფოლადში 0,021 %-დან 0,019 %-მდე. პროცესის უფრო ენერგიული სელის შედგენად მცირდება რკინის ამოწვა, ხოლო მადნიდან რკინის აღდგენის წყალობით იზრდება ვარგისი ფოლადის გამოსავალი (რადა თქმა უნდა – ლითონის საერთო რაოდენობაც). მადნის დამატება აზოტის შემცირების მიზნით უფრო ეფექტურია თომასის პროცესში.

როგორც ცნობილია, აზოტის კონცენტრაცია თომასის პროცესში ძირითადად იზრდება ზედმეტი ბერვის* პერიოდში და მისი შემცველობა მით მეტია, რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა შებერვის ბოლოს. სწორედ ამის გამო დნობის ხელაყენურად გაცივებამ ნახშირბადის ამოწვის პერიოდის ბოლოს უნდა გამოიწვიოს ზედმეტი ბერვის პერიოდში ტემპერატურის შემცირება.

* რედაქტორისაგან: “ზედმეტი ბერვა” იგივეა, რაც ტერმინი “გადაბერვა”.

რის შედეგადაც მიიღება აზოტი და ფოსფორით ნაკლებად გამდიდრებული ფოლადი.

ამ პრინციპს ემყარებოდა ფართოდ გავრცელებული „HPN-პროცესი“ (ქარხანა „ჰამბორნის“ პროცესი ფოსფორის P და აზოტის N დაბალი შემცველობის ფოლადის მისაღებად). ამ პროცესის დამუშავების თავდაპირველ სტადიაში ლითონის გაცივების მიზნით კონვერტერში ზედმეტი ბერვის დაწყების წინ შეჰყავდათ იმდენი ჯართი, რომ შებერვის დასასრულს ფოლადს საკმარისი ტემპერატურა პქონოდა ჩამოსხმისათვის.

შემდგომ აღმოჩნდა, რომ მადნით ან ხენჯით გაცივება უფრო ეფექტურია, ვიდრე ჯართით. მადანი და ხენჯი იწვევს ნახშირბადის დაუანგვის სინქარის ზრდას და ნახშირუანგვის უფრო ინტენსიურ გამოყოფას, რომელსაც გააქვს კონვერტერიდან ლითონის მიერ შთანთქმული აზოტის ნაწილი. გარდა ამისა, მადნის ან ხენჯის დამატება ხელს უწყობს ფოსფორის უფრო დაბალი რაოდენობის შემცველი ლითონის მიღებას. ზედმეტი ბერვის ხანგრძლივობის შემცირება და აბაზანის დაბალი ტემპერატურა ამცირებს ამ პერიოდში აზოტის შთანთქმას. HPN-პროცესით გამოდნობილი ფოლადი შეიცავს 0,006–0,012 % აზოტსა და 0,02–0,05 % ფოსფორს.

ქარხანაში „სტიუარდი და ლლოიდი“ (ინგლისი, ქ. ორბი) შემუშავებულ იქნა დნობის სხვა ვარიანტი მადნის ან ხენჯის დამატებით და იგი ცნობილია „LNP-პროცესის“ სახელწოდებით. ამ პროცესისათვის დამახასიათებელია გამაცივებელი დანამატების ორჯერ შეტანა კონვერტერში – პირველი პერიოდის ბოლოს და გაუნახშირბადოების პერიოდის შუაში. დანამატების გამაცივებელი გავლენა გრძელდება დნობის ბოლომდე.

ფოლადში აზოტის შემცველობის შემცირებას ხელს უწყობს აირებში მისი პარციალური წნევის დაკლება და შებერვის ბოლოს ლითონის დაბალი ტემპერატურა. აზოტის საშუალო შემცველობა ფოლადში იყო 0,0075 %, ხოლო ფოსფორისა კი – 0,03 %. ხენჯის გამოყენებით ჩატარებულ დნობებში საბოლოო წიდაში შეიმჩნეოდა რკინის მომეტებული რაოდენობა (14 % ნაცვლად 12 %-სა).

შუა ლითონის ტემპერატურის შემცირება ხშირად იწვევდა ზემოდან ჩამოსხმის აუცილებლობას. თომასის ფოლადში აზოტის შემცირებაზე დადებით გავლენას ახდენს დამსხვრეული კირქვის დამატება კონვერტერში შებერვისას. მისი დადებითი გავლენა გამოიხატებოდა აირებში აზოტის პარციალური წნევის შემცირებაში კირქვის დაშლის შედეგად ნახშირორჟანგის გამოყოფის გამო.

რადგან კირქვის დაწლა და გადნობა საჭიროებს სითბოს გარკვეულ ხარჯს, ამიტომ მისი გამოყენება შესაძლებელია მხო-

ლოდ დნობის ცხელი სელის შემთხვევაში. ამჟამად თომასის პროცესში კირქვას. როგორც გამაცივებულს, დამოუკიდებლად არ იყენებენ და იგი შეჰყავთ კონვერტერში მადანთან ან ხენჯთან ერთად. თუ რამდენად მიზანშეწონილია ასეთი კომბინაცია, ჩანს იქიდან, რომ შებერვის ბოლოს მაღალი ტემპერატურის შემთხვევაშიც კი მზა ფოლადი შეიცავს 0,010–0,012 % აზოტს. ხოლო ნორმალური ტემპერატურისას – სარგებობლად ნაკლებს.

მიღებული გამაცივებელი დანამატები დიდ ეფექტს მხოლოდ დროულად შეყვანისას იძლევა და ამიტომაც, ეს მომენტი სწორად უნდა იქნეს შერჩეული. ძალზე ნაგვიანვეად შეყვანისას დანამატები ვერ ასწრებს მთლიანად (ბოლომდე) რეაგირებას. ოპტიმალურია დროის ის მომენტი, როცა მთავრდება დნობის ხანგრძლივობის 70–80 %. იგი შეესაბამება ნახშირბადის ამოწვის პერიოდის დასასრულს.

3.1.11. გვერდითი შებერვა და შებერვა დახრილ მდგომარეობაში მყოფ კონვერტერში

აზოტის დაბალი შემცველობის კონვერტერული ფოლადის გამოსადნობად გამოიყენება მცირე ბესემერებაში დამკვიდრებული შებერვის პრინციპი.

გვერდითი შებერვა ან დახრილ კონვერტერში შებერვა ამცირებს ჰაერის კონტაქტს ლითონთან და აზოტის პარციალურ წნევას აირებში. საერთო წნევის შემცირების შედეგად მცირდება ლითონის სეციის სიმაღლე და შესაბამისად – ჰაერის მიერ აბაზანაში გასაველი გზის სიგრძე. ყოველივე ეს იწვევს აზოტის კონცენტრაციის შემცირებას მზა ფოლადში.

გვერდითი შებერვის დროს მცირეაზოტიანი ფოლადის მიღების შესაძლებლობის გამოსარკვევად 2 ტ კონვერტერის გამოყენებით ჩატარდა კვლევები. შემდეგ ეს ხერხი გამოიყენეს დიდი ტონაჟის კონვერტერებში პეტროვისკის სახ. ქარხანაში ქ. დნეპრო-პეტროვსკში.

გვერდით შებერვას ატარებდნენ ჰორიზონტის მიმართ 15°-ით დახრილი და ერთ ხაზზე განლაგებული ხერელისებური ფორმის 5 საქშენით, თითოეულია სიგანით 14 მმ და სიმაღლით 40 მმ. საქშენების ჯამური ფართობი გადაკეთების მერე გახდა 260 სმ². რაც ბევრად აღემატებოდა ადრინდელს. შებერვის ჭარბი წნევა 180–220 კპა-დან (1,8–2,2 ატ). შემცირდა 30–60 კპა-მდე (0,3–0,6 ატ). გვერდითი შებერვის დროს ჰაერის ხარჯი არ აღემატებოდა 515 მ³

წუთში. დნობისას ლითონში აზოტის კონცენტრაციის ცვლილებამ დაადასტურა, რომ მკვლევარების მიერ დასმული ამოცანა გარკვეულად გადაჭრილ იქნა. მთელი დნობის განმავლობაში ლითონი აზოტს მცირე რაოდენობით შეიცავდა და საბოლოო სინჯში, თხევადი ფოლადის მაღალი ტემპერატურის მიუხედავად, რჩებოდა 0,005 %.

ამ ხერხის სერიოზულ ნაკლს წარმოადგენდა კონვერტირის წინა კედლის გაძლიერებული ცვეთა საქმენების პირდაპირ და უკანა კედლისა – მათ ზემოთ.

გვერდითი შებერვა ლითონში აზოტის შემცველობის შემცირების მიზნით გამოყენებულ იქნა დიდი ტევადობის ფუძე კონვერტირებშიც, რომლებიც მუშაობდა სათომასე თუჯზე. თომასის ფოლადის მიღების ეს გაუმჯობესებული ხერხი, რომელიც გამოცადეს გერმანიის ფედერაციულ რესპუბლიკაში მანესმანის ქარხანაში, ცნობილია „MA-პროცესის“ სახელწოდებით.

ქვედა შებერვით მომუშავე საცდელი 30-ტონიანი კონვერტერი გადაკეთდა გვერდითი შებერვის კონვერტერად. მასში გვერდიდან ჩამონტაჟდა ბლოკი, რომელიც შედგებოდა 5 მწკრივისაგან. თითოეულ მწკრივში იყო 25 მმ დიამეტრისა და 4,9 სმ² განივიკვეთის ფართობის მქონე 18 საქმენი განივიკვეთთა ჯამური ფართობით 442 სმ². საქმენების ზედა მწკრივი იმყოფებოდა თხევადი ლითონის წყნარი აბაზანის ზედაპირიდან 50 მმ-ით დაბლა. შებერვისას ჭარბი წნევა იცვლებოდა 60–100 კპა (0,6–1,0 ატ) ფარგლებში.

„MA-პროცესის“ კვლევით დამტკიცდა, რომ გვერდითი შებერვის გამოყენება, მართალია, ახანგრძლივებს დნობას და ზრდის რკინის რაოდენობას წიდაში, მაგრამ შესაძლებელი ხდება აზოტის მცირე – 0,004–0,006 % შემცველობის ფოლადის მიღება (100 საცდელი ნაღობიდან მხოლოდ ხუთში დარჩა 0,01 %-ზე მეტი ეს აირი) მიუხედავად იმისა, რომ თხევად ლითონს საბოლოო ტემპერატურა უფრო მაღალი ჰქონდა, ვიდრე ფსკერიდან შებერვისას.

ლითონის მაღალმა ტემპერატურამ საშუალება მისცა საამქროს ემუშავა სიფონური ჩამოსხმის ხერხით. ეს უზრუნველყოფდა ზოდების კარგ ზედაპირს და თავიდან იქნა აცილებული ის დიდი სირთულეები, რაც დაკავშირებული იყო „HPN-პროცესით“ ცივი ლითონის მიღებასთან.

გვერდითი შებერვის პროცესთან დაკავშირებულმა სირთულეებმა გამოიწვია ახალი ხერხის შემუშავება – ე.წ. ირიბ ანუ დახრილ მდგომარეობაში შებერვა. მას უკავია შუალედური მდგომარეობა ფსკერიდან შებერვასა და გვერდითი შებერვას შორის. ირიბი შებერვა იმითაა ხელსაყრელი, რომ მისი განხორციელება

არაა დაკავშირებული დიდ კაპიტალურ დანახარჯებთან კონვერტერის გადაკეთების დროს. გარდა ამისა, ამ ხერხის უპირატესობაა დნობის ნებისმიერ მომენტში ფსკერიდან შებერვის ნაცვლად დახრილ შებერვაზე გადასვლა კონვერტერის სათანადო შემოტრიალებით პორისონტალური ღერძის გარშემო. დახრილი შებერვის დროს კონვერტერის ფსკერში საქშენების ნაწილი დაყრუებულია, ხოლო დარჩენილი საქშენების დიამეტრი – გაზრდილი.

ერთ-ერთ გერმანულ ქარხანაში განახორციელეს ქვედა შებერვის 30-ტონიანი კონვერტერიდან გვერდითი შებერვის კონვერტერზე გადასვლის ორი ვარიანტი. ერთ შემთხვევაში დააყრუეს 69 ხერელი, ხოლო დარჩენილი ხერელების დიამეტრი, რომელთა რიცხვიც დაახლოებით ნახევარი იყო, გაადიდეს 15 მმ-დან 19 მმ-მდე. მეორე შემთხვევაში ფსკერში დატოვეს ხერელების მხოლოდ 5 რიგი და მათი დიამეტრი გაადიდეს 25 მმ-მდე.

პირველი ვარიანტით ჩატარებულ „თომასის“ დნობებში, სადაც ლითონს აციეებდნენ მადნით, შესძლეს აზოტის კონცენტრაციის შემცირება 0,0092 %-მდე. დაბალი იყო აგრეთვე რკინის შემცველობაც წიდაში – 9,1 %. საამქროში მომუშავე სხვა კონვერტერებთან შედარებით დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 10–20 %-ით.

მეორე შემთხვევაში, მიუხედავად იმისა რომ ლითონი არ გაუცივებიათ მადნით, აზოტის შემცველობა უფრო დაბალი იყო – საშუალოდ 0,0083 %. რკინის რაოდენობა წიდაში არ აღემატებოდა 9 %-ს, მაგრამ საქშენების ასეთი განლაგებისას შებერვა შესაძლებელი იყო მხოლოდ მცირე კუთხეებით მიწოდების შემთხვევაში.

შებერვის მიწოდების კუთხის ზრდა, განსაკუთრებით კი ვერტიკალური შებერვა, პროცესის გაგრძელებას შეუძლებელს ხდიდა, რადგანაც იზრდებოდა ლითონის ამოსროლის რიცხვი. ორივე შემთხვევაში ფსკერის მდგრადობა უმნიშვნელოდ უარესდებოდა. უფრო მეტად მცირდებოდა ამონაგის მედეგობა, განსაკუთრებით კი – საქშენების საწინააღმდეგო მხარეს წიდაზე ზემოქმედების ადგილას.

ამერიკაში გვერდითი შებერვის ხერხით მცირე აზოტიანი ფოლადის მიღების მიზნით დაამუშავეს კონვერტერების ახალი ფორმა – გვერდითი შებერვა სწორკუთხა კვეთით. ისინი ცნობილია „ტურბოკონვერტერის“ სახელწოდებით. აბაზანის ზემოთ სამუშაო სივრცის კონფიგურაციის შეცვლა-გაზრდასთან ერთად კონვერტერის სასურველი დახრით გვერდითი და დახრილი შებერვის განხორციელება მიზნად ისახავდა ლითონსა და წიდასთან აირადი ფაზის შერევის ინტენსიფიცირებას მინარეების სწრაფად ამო-

წვისა და ნახშირბადის სრული წვის სითბოს უკეთ გამოყენებისათვის.

პირველი ცდები ჩაატარეს ბესემერის 3-ტონიან საცდელ კონვერტერში, რომელსაც ჰქონდა ექვსი საქშენი. თითოეულის გამოსასვლელი კვეთი იყო 50 მმ², ხოლო თუჯის შედგენილობა კი — 0,40 % Mn, 1,25 % Si, 0,105 % P და 0,035 % S. შებერვას ატარებდნენ სამი ხერხით: პაერის მიწოდებით ლითონის ზედაპირზე, ლითონის ზედაპირის ქვემოთ და კომბინირებულად.

აზოტისა და ნახშირბადის მცირე შემცველობამდე დასაყვანად მიზანშეწონილად ჩაითვალა შებერვა ლითონის ზედაპირზე დნობის პროცესის უმეტეს დროს, ხოლო დნობის დასასრულს — ლითონში. ცდების შემდეგ იმუშავეს 22 ტონიან სამრეწველო კონვერტერზე, რამაც დაამტკიცა წინასწარი შედეგები. დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 20 წუთით და გახდა მინიმალური — 10,5 წუთი. აზოტის კონცენტრაცია შებერვის ხერხის მიხედვით ფოლადში იყო 0,003—0,008 %. ცხელ ლითონს აცივებდნენ წყლის ორთქლით, ჯართით ან მადნით. წიდაში მაღალი იყო რკინის შემცველობა და ბევრი ლითონი იკარგებოდა ძლიერი ამოსროლების გამო, რაც გავლენას ახდენდა ვარგისი ფოლადის გამოსავალზე, რომელიც შეადგენდა 78—92 %-ს. ამ მეთოდის სერიოზული ნაკლია ამონაგის, განსაკუთრებით კი საქშენებისა და მის ახლო მდებარე ზონის მცირე მედეგობა.

ფუძე კონვერტერებში გვერდითი შებერვა ძალზე გავრცელდა ჩინეთში. გამოიყენებოდა ჩვეულებრივი ცილინდრული კონვერტერები ან ტურბოკონვერტერები ტევადობით 2—6 ტ. ამონაგს აკეთებდნენ დოლომიტის და ქვანახშირის ფისის ნარევისგან. თხევადი თუჯი მიიღებოდა ბოვიდან და ჰქონდა შემდეგი შედგენილობა: 0,9—1,2 % Si; 1,3—2,0 % Mn; 0,25—1,8 % P და S < 0,06 %. დნობის ხანგრძლივობა შეადგენდა 11—37 წუთს და დამოკიდებული იყო შებერვის მიწოდების ხერხზე. შებერვის მიწოდება გავლენას ახდენს აგრეთვე მინარევების ამოწვის მიმდევრობაზე. ზედაპირულ შებერვის დროს ფოსფორი და ნახშირბადი ერთად იწვის. სიღრმეში შებერვისას მინარევების ამოწვის მიმდევრობა, განსაკუთრებით კი ფოსფორისა, უახლოვდება ჩვეულებრივი თომასის პროცესს. მზა ფოლადი შეიცავდა 0,007—0,009 % აზოტს. პროცესის ძირითადი ნაკლია ამონაგის დაბალი მდგრადობა, განსაკუთრებით კი საქშენებთან.

3.1.12. ბესემერისა და თომასის კონვერტერებში გამოდნობილი ფოლადების თვისებები და გამოყენება

ერთნაირი ქიმიური შემადგენლობის შემთხვევაში ბესემერის კონვერტერში გამოდნობილი ფოლადი მარტენის ღუმელში გამოდნობილთან შედარებით გამოირჩევა მეტი სიმტკიცით, სისაღით, ცვეთამედეგობით, სიმყიფით (დაბალ ტემპერატურებზე – განსაკუთრებით) და დაბალი პლასტიკურობით. თვისებათა ამგვარი შეხამების მიზეზია ფოლადში ფოსფორისა და განსაკუთრებით, აზოტის მაღალი შემცველობები (0.06–0.07 % P და 0.10–0.030 % N). მარტენის ღუმელში მიღებულ ფოლადში ფოსფორის რაოდენობა იშვიათად აღემატება 0,030–0,040 %-ს, ხოლო აზოტის ზღვრული კონცენტრაციაა 0,008%, უმეტესად კი – 0,004–0,006 %. ბესემერის ხერხით მიღებულ ფოლადში აზოტის მაღალი კონცენტრაცია აიხსნება თხევადი ლითონისა და შებერილი ჰაერის უშუალო კონტაქტით. ქმინებიდან გამოსული ჰაერისა და ლითონის შეხების ადგილას წარმოიქმნება მაღალტემპერატურული ლოკალური ზონა, სადაც ხდება აზოტის დისოციაცია და მისი გახსნა ლითონში.

აზოტი ზრდის ფოლადის მიდრეკილებას „დაბერებისაკენ“ ანუ „დაძველებისაკენ“, რის შედეგად იგი დროთა განმავლობაში კარგავს პლასტიკურობას და მყიფე ხდება (მყიფდება). ეს განსაკუთრებით შეიმჩნევა 200–300 °C-ზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზე დაყოვნებისას და ცივი დეფორმაციის შემდეგ. დადგენილია, რომ შებერვის ხანგრძლივობის შემცირებისას იკლებს ჰაერისა და ლითონის კონტაქტის ხანგრძლივობა და შესაბამისად – ლითონში გახსნილი აზოტის რაოდენობა.

ბესემერის ხერხით მიღებული ფოლადი გამოირჩევა შემდეგი თვისებებით: კარგი სამჭედლო შედუღების უნარი და ამიტომაც ამზადებენ მისგან შენადული მილების წარმოებისათვის საჭირო „შტრიპსებს“ (ზოლებს); შედუღების კარგი უნარი (კარგი შედუღებადობა) აირული შედუღების დროს, რასაც ვერ ვიტყვით ელექტროკალურ შედუღებაზე. ამ ფოლადისაგან მზადდება მაღაროს რელსები, სარკინიგზო ქვესადებები და ზედსადებები, შველერები, დიდი ზომის ორტესებრი კოჭები, სორტული რკინა ლითონის ნაკეთობათა წარმოებისათვის, თხელი ფურცელი არალრმა ტვიფურისათვის (შტამპისათვის), არასაპასუხისმგებლო დანიშნულების საშუალო სისქის ფურცელი, საავტომატე ფოლადი, საარმატურე რკინა, ჭანჭიკები და ქანჩები.

თომასის ხერხით მიღებული ფოლადი მარტენის ღუმელში გამოდნობილთან შედარებით გამოირჩევა ფოსფორის, აზოტისა და

ჟანგბადის უფრო მაღალი შემცველობით. მაგალითად, ფოსფორის კონცენტრაცია მერყეობს 0,05–0,09 %-ის უარგლებში, რაც განაპირობებს თომასის ხერხით მიღებული ფოლადის მიდრეკილებას ციემეტეხობისაკენ; აზოტის რაოდენობა იცვლება 0,025–0,030 %-ის უარგლებში. მისი მოლეკულების დისოციაცია და ლითონში გახსნა ბესემერის პროცესის მსგავსად ხდება ქშინებიდან გამოუსული ჰაერისა და ლითონის შეხების ლოკალურ ზონაში განვითარებული მაღალი ტემპერატურის წყალობით.

ბესემერის ფოლადთან შედარებით თომასის ფოლადში უფრო მეტი აზოტი იხსნება. ეს გამოწვეულია თომასის პროცესში მესამე პერიოდის ანუ ზედმეტი ბერვის პერიოდის აუცილებელი არსებობით, რაც საჭიროა ფოსფორის მოსაშორებლად. ამ დროს აბაზანაში აღარ გვაქვს ნახშირბადი, რომლის დაჟანგვის შედეგად წარმოქმნილი ნახშირჟანგის ბუშტულები იწვევს ლითონის ინტენსიურ არევას, აზოტის შთანთქმას და მის გამოტანას კონვერტერშიდან.

ჟანგბადის მაღალ რაოდენობას, ძირითადად არალითონური ჩანართების სახით, განაპირობებს მესამე პერიოდში ფოსფორის ჟანგვა, მისი ანჰიდრიდისა და განმჟანგველების ჟანგულების წარმოქმნა, რომლებიც ვერ ასწრებენ ლითონიდან წიდაში გადასვლას. აზოტის მსგავსად, ჟანგბადი ზრდის ფოლადის მიდრეკილებას დაბერებისაკენ.

ბესემერის ფოლადის მსგავსად, თომასის ფოლადი მარტენის ფოლადთან შედარებით, გამოირჩევა უფრო მაღალი სიმტკიცითა და სისაღით, დაბალი პლასტიკურობითა და დარტყმითი სიბლანტით.

თომასის ფოლადისაგან მზადდება რიგითი დანიშნულების ფასონური და ფურცლოვანი კონსტრუქციები, რბილი მავთული, რელსები, ცხელი შტამპვის (ტვიფერის) ქანჩები. არადეფორმირებადი თხელი ფურცლები, თეთრი თუნუქი, შესაფუთი ფურცლები და ზოლური ფოლადი.

ქანგბად-კონვერტერული პროცესი

3.2.1 ქანგბად-კონვერტერული პროცესის აღმოცენება

კონვერტერულ პროცესში ქანგბადის გამოყენების შესახებ აზრი გამოთქვეს 1872 წ. დ. ჩერნომეა და 1899 წ. დ. მენდელეევი, მაგრამ ამ აირის იმჟამინდელი სიძვირის გამო ცდების ჩატარება შეუძლებელი იყო.

კლასიკურ კონვერტერულ პროცესებში თუჯის მინარეების დიდი სიჩქარით ამოწვის მიუხედავად, მაინც იგრძნობა ქანგბადის უკმარისობა. ამის დასტურია თუნდაც ის, რომ კონვერტერული დნობის მეორე პერიოდში ჰაერის შებერვით შეტანილი ქანგბადის სიმცირის გამო ნახშირბადის დაქანგვაში მონაწილეობს წიდაში მყოფი რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგები. ასეთ პირობებში ქანგბადით გამდიდრებული ჰაერის ან სუფთა ქანგბადის შებერვა გამოიწვევდა ნახშირბადის ამოწვის სიჩქარის კიდევ უფრო მეტ ზრდას. გამოთქმული მოსაზრებების სისწორე დამტკიცდა პირველსავე საცდელ დნობებზე, რომლებიც ჩატარდა 1925 წ. ქარხანა ობერჰაუსენში (გერმანია).

მაქსიმლიანოუტეს ფირმის ქარხანაში ზულცბახ-როზენბერგში (გერმანია) 1939 წ. ჩატარდა ცდები ქანგბადით გამდიდრებული ჰაერის გამოყენებით. ქანგბადით 28 %-მდე გამდიდრებული ჰაერის გამოყენებისას თოქსის საამქროს წარმადობა გაიზარდა 16 %-ით, ხოლო 35 %-მდე გამდიდრებისას – 25 %-ით. მაგრამ წარმადობის ზრდასთან ერთად ძალზე დიდი მნიშვნელობა აქონდა ფოლადში აზოტის გახსნის შემცირებას, რაც აიხსნება შენაბერ ჰაერ-ქანგბადის ნარევი აზოტის პარციალური წნევის შემცირებით. როგორც ჩვენთვის ცნობილია, ორვალენტიანი აირების ხსნადობა ფოლადში მათი პარციალური წნევის კვადრატული ფესვის პროპორციულია. კერძოდ, აზოტისათვის გვაქვს

$$[N] = K\sqrt{P_N}$$

ამ ქარხანაში გამოდნობილ ფოლადში აზოტის შემცველობა მკირდებოდა 0,02 %-მდე, ხოლო ზოგჯერ – 0,008 %-მდეც. აზოტის შემცველობის ასეთ შემცირებას, ჰაერის გამდიდრების გარდა, ხელს უწყობდა აგრეთვე ლითონის ტემპერატურის კლება ჯართის დამატებისას, რაც აუცილებელი იყო პროცესის ნორმალური

ტემპერატურული რეჟიმისათვის. ეს კი იწვევდა ფოლადის გამოსაფლისა და კონვერტერის წარმადობის ზრდას. ამასთან ერთად შემჩნეული იყო, რომ 60 %-მდე ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერის შებერვისას ჯართის დიდი რაოდენობით გადამუშავების გარდა შესაძლებელი შეიქნა 1,4 %-მდე ფოსფორის შემცველი თუჯების გადამუშავება. იგივე უნდა ითქვას დაბალსილიციუმის თუჯების გადამუშავების შესაძლებლობის შესახებ. ამრიგად, ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერის გამოყენებით შესაძლებელი ხდებოდა კონვერტერებში ჩვეულებრივი სამარტენე (0,6–0,9 % Si და 0,15–0,30 % P) თუჯების გადამუშავება.

ჩატარებული ცდებით დადგინდა შებერვისას (გაქრევისას) ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერის გამოყენების სამი დადებითი შედეგი:

- 1) წარმადობის გაზრდა;
- 2) აზოტის შემცველობის შემცირება;
- 3) ნებისმიერი თუჯის გადამუშავების შესაძლებლობა

ჯართთან ერთად.

მიღებული დადებითი შედეგების მიუხედავად, ჟანგბადის გამოყენება კონვერტერებში საწარმოო მასშტაბით არ მომხდარა და ეს ძირითადად აიხსნებოდა ჟანგბადის სიძვირით.

1939 წ. რუსმა ფიზიკოსმა აკად. პ. კაპიცამ შეიმუშავა საწარმოო მასშტაბით იაფი ჟანგბადის მიღების ხერხი. ჰაერის დაბალ ტემპერატურებზე გაცივებით და წნევის დაწვეით „ტურბოდეტანდერებში“ მან მიიღო აირადი და თხევადი ჟანგბადი და აზოტი. პროცესი ემყარება იმ პრინციპს, რომ ჟანგბადის დუღილის ტემპერატურაა -183°C , ხოლო აზოტისა კი -196°C . ჰაერის* ასეთ დაბალ ტემპერატურებზე გაცივების შემდეგ ეს აირები შორდება ერთმანეთს.

3.2.2. ჟანგბადის გამოყენება ქვემოდან შებერვით მომუშავე კონვერტერებში

სამრეწველო მასშტაბით ჟანგბადის მიღების იაფი და ხელმისაწვდომი ხერხის დამუშავების შემდეგ კონვერტერებში ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით ცდებმა საგრძნობლად იმატა.

1944 წ. მოსკოვის მახლობლად, ქ. მიტიშჩის ქარხანა „დინამოში“ მცირე ტევადობის კონვერტერში ჩაატარეს ცდები

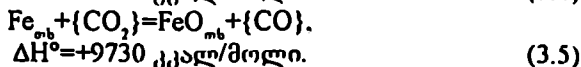
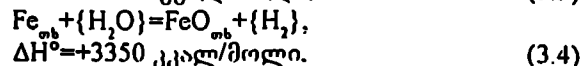
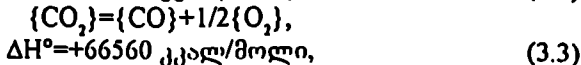
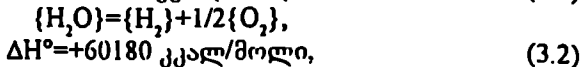
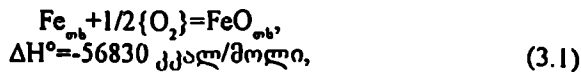
* რედაქტორისგან: ჰაერი არის 78 % აზოტის, 21 % ჟანგბადისა და სხვა აირების ნარევი.

ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით. მიღებული შედეგები არ გამოქვეყნებულა.

1945 წ. კუნეცკის მეტალურგიულ კომბინატში პროფ. ე. კონდაკოვმა 1,5 ტ ტეფალობის ბესემერის კონვერტერში ჩაატარა არაერთი დნობა ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით. ცდების დროს კონვერტერში უბერაფდნენ 50 და 75 % ჟანგბადის შემცველ ჰაერ-ჟანგბადის ნარევეს (ჟანგბადით გაზდიდრებულ ჰაერს) და ტექნიკურად სუფთა ჟანგბადს. დნობის ხანგრძლივობა შეადგენდა 4-5 წუთს. მიუხედავად იმისა, რომ თუჯში სილიციუმის კონცენტრაცია არ აღემატებოდა 0,4-0,7 %-ს, დნობების ჩატარებისას ადგილი არ ჰქონია რაიმე გართულებას. მინარევების ამოწვა ხდებოდა ჩვეულებრივი თანამიმდევრობით. დნობების შედეგად მიიღებოდა მშვიდი მარკის ფოლადები 0,05-0,20 % ნახშირბადის შემცველობით. მიღებული ფოლადი გამოირჩეოდა აზოტის დაბალი კონცენტრაციით. სუფთა ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით ჩატარებული დნობების შედეგად მზა ფოლადში იყო 0,001-0,002 % აზოტი. ჟანგბადით 75 და 50 %-ით გამდიდრებული ჰაერის შებერვით ჩატარებული დნობების შემდეგ აზოტის შემცველობა ფოლადში შესაბამისად იყო 0,0038% და 0,0059%, რაც საგრძნობლად ნაკლებია მარტენისა და ელექტრორკალურ ღუმელებში გამოდნობილ ფოლადებთან შედარებით.

ასეთი უპირატესობის მიუხედავად, ჩატარებული ცდების უარყოფით მხარეს წარმოადგენდა კონვერტერის ფსკერის დაბალი მდგრადობა (1-2 დნობა), რაც აიხსნება ორი მიზეზით. კონვერტერის ფსკერში დატანებული კერამიკული ქშინებიდან გამოსული ჟანგბადის ლითონთან შეხვედრის ადგილას ვითარდება ძალზე მაღალი ტემპერატურა (2500 °C), რაც იწვევს ამონაგის გაძლიერებულ ცვეთას. გარდა ამისა, ჟანგბადი ინტენსიურად ჟანგავს რკინას, რის შედეგადაც წარმოქმნილი რკინის ქვეყანგი ურთიერთქმედებს კონვერტერის მყავე ამონაგთან და იწვევს მის დაშლას.

ზემოხსენებულ უარყოფით მოვლენებთან ბრძოლის მიზნით გამოთქმული იყო მოსაზრება გაქრევისთვის გამოყენებინათ ჟანგბად-ნახშირორჟანგის ან ჟანგბად-წყლის ორთქლის ნარევი. ასეთი ნარევი, ერთი მხრივ, ნაკლებად დამჟანგველუნარიანია და არ გამოიწვევდა რკინის ინტენსიურ დაჟანგვას, ხოლო მეორე მხრივ, ნახშირორჟანგისა და წყლის ორთქლის დაშლისას დაიხარჯებოდა სითბო, რაც გამორიცხავდა ლითონის ლოკალურ გადახურებას. უკანასკნელი მოსაზრების ჭეშმარიტებაში ადვილად დავრწმუნდებით რკინის დაჟანგვის რეაქციების თერმოდინამიკური ანალიზით:



ამ მონაცემების მიხედვით, სუფთა ჟანგბადით 1 კგ რკინის დაჟანგვის შემთხვევაში გამოიყოფა 1015 კკალ სითბო, ხოლო წყლის ორთქლით ან ნახშირორჟანგით დაჟანგვისას ადგილი აქვს შესაბამისად 60 და 174 კკალ სითბოს შთანთქმას.

ქვინებიდან გამოსული ჟანგბად-წყლის ორთქლის ნარევისა და ლითონის შეხების ადგილას ისეთივე ტემპერატურის მისაღებად, როგორცაა ჰაერის გამოყენებისას, საჭიროა ნარევის შედგენილობის რეგულირება. პროცესის ნორმალურად ჩატარებისათვის ჟანგბად-წყლის ორთქლის ნარევის უნდა ჰქონდეს 170–180 °C ტემპერატურა, რისთვისაც კონვერტერში შესვლამდე წყლის ორთქლს გადაახურებენ; ჟანგბადს კი გაახურებენ.

ქვინის გამოსასვლელ უბანში ნორმალური ტემპერატურის მისაღებად ჟანგბადისა და წყლის ორთქლის მოცულობითი წილი ნარევაში უნდა იყოს შესაბამისად 49 და 51 % (მასის მიხედვით შესაბამისად იქნება 63 და 37 %).

ჟანგბად-წყლის ორთქლის ნარევის გამოყენებით გამოდნობილი ფოლადი შეიცავდა 0,0025–0,0030% აზოტს.

3.2.3. ნახშირორჟანგის ან წყლის ორთქლისა და ჟანგბადის ნარევის გამოყენება შებერვისას

კონვერტერული დნობისათვის ნახშირორჟანგისა და წყლის ორთქლის გამოყენების მიზანს შეადგენს შესაბერ აირებში აზოტის პარციალური წნევის დაკლება და ამის შედეგად ლითონში ამ აირის შემცველობის შემცირება. საკითხს რადიკალურად წყვეტს შებერვისას ისეთი აირის გამოყენება, რომელსაც არ შთანთქავს ლითონი და რომელიც არ აუარესებს მის თვისებებს. ამ საკითხს მარტივად წყვეტს აირების შესაბერ ნარევაში აზოტის ჩანაცვლება ჟანგბადით. თუმცა მისი გამოყენება ამცირებს ამონაგის მდგრა-

დობას, ზრდის ლითონის ნაშვს და იწვევს სხვა უარყოფით მოვლენებს. ამიტომ პრაქტიკულად ჟანგბადით ჰაერის გამდიდრება მიზანშეწონილია 40-45 %-მდე.

ზემოჩამოთვლილის გამო ყურადღებას იპყრობდა შებერვისას აზოტის შეცვლა სხვა რომელიმე ნაკლებად დამუარგველი აირით. ჟანგბადის განზავება ასეთი აირით იძლეოდა ისევე დამუარგველ ნარევეს, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ მისი დამუარგველი ზეგავლენა დაკავშირებული იყო სითბოს შთანთქმასთან და არა გამოყოფასთან. ამის გამო ჟანგბადის და შესაბერი აირის თანაფარდობის სწორი შერჩევისას შესაძლებელია ისეთი ნარევის მიღება, რომელიც სითბური მოქმედებით ჰაერს გაუტოლდება. ეს გამორიცხავს ადგილობრივ გადახურებას, შედეგად კი შეამცირებს მისგან გამოწვეულ ამონაგის ცვეთასა და რკინის ნაშვს.

ჟანგბადისა და ნახშირორჟანგის ნარევის გამოყენების პირველი ცდები ჩაატარეს ბელგიაში. შედეგთში და გურ-ში 13-14 და 25-30 ტონიან კონვერტერებში. კონვერტერები მუშაობდნენ თითქმის ერთნაირი შედგენილობის სათომასე თუჯზე.

გამოცადეს შებერვის სხვადასხვა მეთოდი (ვარიანტი): მთელი დნობის მანძილზე ჟანგბად-ნახშირორჟანგის ნარევი ან დნობის საწყის პერიოდებში ჰაერისა და გამდიდრებული ჰაერის ნარევი, ხოლო შემდეგ - აირების ნარევი. არც ერთ შემთხვევაში შემჩნეული არ იყო რაიმე ახალი ან არსებითი ცვლილება მინარევების ქცევაში (ამოწვის თანამიმდევრობა და სინქარე) ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერის შებერვით თომასის კონვერტერში ჩატარებულ დნობასთან შედარებით.

ძირითადი განსხვავება შეეხებოდა მხოლოდ აზოტის ქცევას და მის საბოლოო შემცველობას ლითონში. საგულისხმოა, რომ ყველა ზემოჩამოთვლილ ვარიანტში ლითონში აზოტის შემცველობა შებერვის პირველ ხანებში ერთნაირია. ამან მკველევარები მიიყვანა იმ დასკვნამდე, რომ უაზოტოდ შებერვა დნობის პირველ ხანებში არაა მიზანშეწონილი ჟანგბად-ნახშირორჟანგის ნარევის სიძვირის გამო, რომლის გამოყენებაც მთელი დნობის მანძილზე უარყოფითად მოქმედებს პროცესის სითბურ ბალანსზე.

ფიქრობდნენ, რომ ყველაზე მიზანშეწონილი იქნებოდა დნობის პირველ ხანებში გამოყენებინათ ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერი, ხოლო ნახშირბადის ამოწვის დასასრულს - ჟანგბად-ნახშირორჟანგის ნარევი. ასეთი ვარიანტით მუშაობისას კონვერტერიდან გამომავალი აირები შედგება მხოლოდ ნახშირჟანგისა და ნახშირორჟანგისაგან, რაც იძლევა 0,003 % აზოტის შემცველი ფოლადის მიღების საშუალებას.

ნარკევის შედგენილობა შეიძლება ფართო ზღვრებში იცვლებოდეს, მაგრამ თუ იგი დიდი რაოდენობით შეიცავს ნახშირორქანს, მაშინ სითბოს ხარჯის საკომპენსაციოდ დნობის პირველ პერიოდში საჭიროა ჰაერის უფრო მეტად გამდიდრება ჟანგბადით. საუკეთესოდ უნდა ჩაითვალოს 50 % CO₂-სა და 50 % O₂-ის შემცველი ნარევი, რადგან ჟანგბადის უფრო მეტი რაოდენობა გამოიწვევს საქშენების მედეგობის შემცირებას.

აღნიშნული ხერხით თომასის კონვერტერში მიღებული ფოლადი შეიცავს ყველაზე ნაკლებ აზოტს. ასეთ ფოლადს ახასიათებს გაზრდილი პლასტიკურობა და ნაკლები მიდრეკილება დაძველებისაკენ. აღნიშნული მეთოდის უარყოფითი მხარეა რკინის დიდი ნაშვვი, რის გამოც იზრდება წიდაში რკინის ჟანგეულების წილი თომასის ჩვეულებრივ პროცესთან შედარებით.

წყლის ორთქლის გამოყენება კონვერტერულ პროცესებში არ წარმოადგენს სიახლეს. ამერიკული პრაქტიკიდან ცნობილია ბესემერის კონვერტერში მიმდინარე ძალზე ცხელი დნობის გაცივება წყლის ორთქლით, თუმცა მისი გამოყენება აზოტის შემცირების მიზნით დაიწყეს ნახშირორქანის გამოყენებასთან ერთად 1947 წ. გერმანიაში და შემდეგ – ბელგიაში. პირველად მხოლოდ წყლის ორთქლი შეუბერეს თუჯს, მაგრამ წარუმატებლად – სითბურ ბალანსში სითბოს დიდი დანაკლისი იყო და ლითონი ვერ გაახურეს საჭირო ტემპერატურამდე. შემდეგ ცდები ჩაატარეს 3-ტონიან კონვერტერში. გამოიყენეს სათომასე თუჯი. შესაბერი ნარევი შედგებოდა წყლის ორთქლისა და ჟანგბადისაგან თანაფარდობით 1-დან 2-მდე. ამ ნარევის შებერვა გრძელდებოდა მთელი დნობის მანძილზე.

ჩვეულებრივ დნობასთან შედარებით იზრდებოდა ლითონთან მიყვანილი ჟანგბადის რაოდენობა (წყლის ორთქლის სრული დისოციაციის შედეგად), ხოლო ეს კი ახდენდა გავლენას მინარეგების ამოწვის სიჩქარეზე. სილიციუმი და მანგანუმი იწვოდა დნობის პირველ წუთებში. დეფოსფორაციის დროს არ შეიმჩნეოდა ე.წ. „მანგანუმის კუზი“. საგრძნობლად ინტენსიურად იწვოდა ნახშირბადი, გამოყოფილი CO ამცირებდა აზოტის პარციალურ წნევას აირად ფაზაში და ამის შედეგად ხელს უწყობდა მის შემცირებას ლითონში.

წყლის ორთქლის დისოციაციის შედეგად ჟანგბადის წილის მატება შენაბერი აირების ნარევიში ზრდიდა და ჟანგული რკინის რაოდენობას, რაც ააქტიურებდა წიდას და აჩქარებდა დეფოსფორაციას.

დნობის ყველაზე გამართლებულ ვარიანტს წარმოადგენს ბელგიის ქარხანაში „ესპერანს ლონდო“ განხორციელებული ხერ-

ხი. ამ ხერხით პირველი ოთხი წუთის განმავლობაში კონვერტერში შეჰყავთ 30 %-მდე ჟანგბადით გამდიდრებული ჰაერი, შემდეგ კი დნობის ბოლომდე (4-5 წუთის განმავლობაში) - ჟანგბად-ორთქლის ნარევი, რომლის შედგენილობაა 63-70 % O_2 და 37-30 % H_2O . გამდიდრებული ჰაერის გამოყენებით ლითონი ისე ცხელდება, რომ შეიძლება თუჯის წონის 34-38 % ჯართის გამოყენება. ჟანგბადის ხარჯი შეადგენდა 42-48 მ³/ტ თუჯზე. განახორციელეს აგრეთვე იმავე შედგენილობის ჟანგბად-ორთქლის ნარევის შებერვა ლითონში მთელი დნობის მანძილზე. ამ ხერხმაც გაამართლა და მიღებულ ლითონში იყო 0,0025-0,0030% აზოტი.

ფოსფორისა და გოგირდის ამოწვის მხრივ, ჟანგბად-ორთქლის ნარევის გამოყენების ხერხი არ ხასიათდება უპირატესობით სხვებთან შედარებით, მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ, რომ მცირდება დნობის ხანგრძლივობა, შესაძლებელი ხდება მუშაობა შუალედური წიდის მოხდით ანუ ღრმა დეფოსფორაციისა და დესულფურაციის ჩატარება.

ჟანგბად-ორთქლის ნარევის გამოყენების დადებითი მხარეა კონვერტერიდან მურა ბოლის გამოყოფის შეწყვეტა, რასაც იწვევს რკინის აორთქლების შემცირება. ამ ნარევით მუშაობას არ გამოუწვევია აგრეთვე კონვერტერის ამონაგისა თუ საქშენების მედეგობის შემცირება და წყალბადის რაოდენობის გაზრდა ფოლადში. რომელიც თვისებებით მიუახლოვდა მარტენისას.

ჟანგბად-წყლის ორთქლის ნარევის გამოყენებით ენაკიევის ქარხანაში გაქრევა ჩატარეს თუჯზე. რომელიც შეიცავდა 0,7-1,0 % Si და 0,078-0,14 % P. დნობისას გამოიყენეს კირი. მზა ფოლადში აზოტის კონცენტრაციის ცვლილების ფარგლები იყო 0,0010-0,005 % (საშუალოდ 0,0021 %), ხოლო წყალბადისა - 0,5-13,0 სმ³/100გ.

გასული საუკუნის 60-იან წლებში ძერჟინსკის სახელობის ქარხანაში გაქრევისათვის გამოიყენეს სამი აირის ნარევი (წყლის ორთქლი-ჟანგბადი-ჰაერი). დნობები ჩატარდა მჟავე ამონაგიან კონვერტერში სარელსე და მდულარა ფოლადების გამოსადნობად. სამმაგი ნარევით გაქრევისას ლითონში წყალბადის რაოდენობა აღწევდა 5-6 სმ³/100გ, ხოლო დნობის ბოლოს ჰაერის გამოყენებისას - 2-3 სმ³/100გ.

ნებისმიერი შედგენილობის თუჯის გადამუშავებისა და ჟანგბადის გამოყენებით მაღალი ხარისხის ფოლადის მიღების სურვილი იმდენად მიმზიდველი იყო, რომ მეტალურგები მუშაობდნენ უფრო სრულყოფილი ხერხის მიკვლევაზე. ამ მიმართულებით წარმატებას მიაღწიეს ავსტრიელმა მეტალურგებმა. 1953 წ. „ფისტ-ალპინეს“ ფირმის ქარხნებში ლინცსა და დონაეიცში დანერგეს

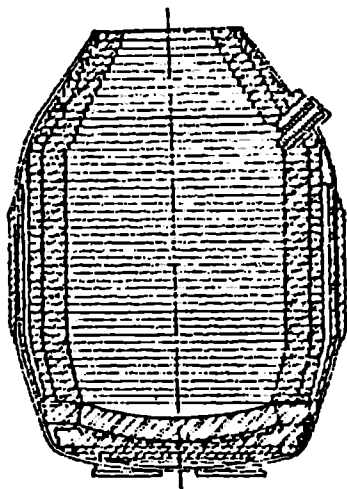
კონვერტერში ტექნიკური ჟანგბადის ზემოდან შებერვის ხერხი. ჟანგბადის შებერვა ხორციელდებოდა წყლით საცივებელი სპეციალური კონსტრუქციის ქშინით. დნობის ამ ხერხს, მისი შემუშავებული ქარხნების პატივსაცემად დაერქვა ლდ-პროცესი* (ლინცის და დონაეცის პროცესი). რუსეთში ამ ხერხმა მიიღო ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის სახელწოდება.

3.2.4. ჟანგბად-კონვერტერის კონსტრუქცია და ქშინის ანგარიშის მეთოდის

კონვერტერში სუფთა ჟანგბადის გამოყენების პირველსავე ცდებზე დამტკიცდა ქვემოდან მისი შებერვის მიზანშეუწონლობა ფსკერის მცირე მდგრადობის გამო. ამ გარემოების გათვალისწინებით ფესტ-ალპინეს ფირმის მეტალურგებმა წამოაყენეს წინადადება ყრუფსკერიან კონვერტერში ჟანგბადის ზემოდან შებერვის შესახებ.

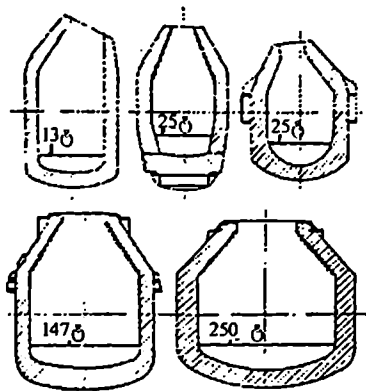
ჟანგბად-კონვერტერი დიდად არ განსხვავდება ჩვეულებრივისაგან (სურ. 3.14). კონვერტერის ხახა, უმეტეს შემთხვევაში, სიმეტრიულია. ჩვეულებრივი კონვერტერისაგან განსხვავებით, ხახაზე კეთდება ფოლადის გამოსაშვები ხვრელი. კონვერტერის ფსკერი მზადდება მისადგმელი, რაც აადვილებს მის შეცვლას რემონტების დროს. ჟანგბადზე მომუშავე კონვერტერების პროფილი განიცდის განუწყვეტლივ ცვლილებას და მათ სახეს განსაზღვრავს კონვერტერის ტევადობა (სურ. 3.15).

კონვერტერში ჟანგბადის შებერვა ხდება წყლით საცივებელი ქშინით. იგი მზადდება ფოლადის სამი უნაკერო მილისაგან, რომელთა ბიძ ერთმანეთში კონცენტრულადაა ჩასმული (სურ. 3.16). ცენტრალური



სურ. 3.14. გამოსაშვებხვრელიანი ყრუფსკერიანი ჟანგბად-კონვერტერის ჭრილი

* ზოგიერთი "ლდ-პროცესის" სახელწოდებას განმარტავს როგორც "ლინცის შებერვის პროცესს (Linzer Düsenverfahren)".



სურ. 3.15. ჟანგბად-
კონვერტერის პროფილის
სახესხეაობები



სურ. 3.16. წყლით საცივებელი ქშინი
ჟანგბადის შესაბერად

- 1 - გარეთა მილი; 2 - გამყოფი მილი;
- 3 - ჟანგბადის მიმწოდებელი შიგა მილი;
- 4 - ქშინის თავი (ბუნიკი)

მილით მიეწოდება ჟანგბადი, ორი გარე მილი კი გამოიყენება წყლით გაცივებისათვის. ქშინის ბოლოს უკეთდება თავი (ბუნიკი), რომელიც მზადდება სპილენძისგან და ქშინზე მაგრდება დახრახინით ან შედუღებით. ქშინს ევრტიკალურად აყენებენ კონვერტერში - მისი ღერძის თანხედრილად. გამაცივებელ წყალს აწოდებენ ისეთი წნევით, რომ გამოსვლისას არ გახურდეს 40°C ტემპურატურაზე უფრო მეტად, რისთვისაც საკმარისია მისი მიწოდება $0,6-0,8$ მგნ/მ² (6-8 ატ) წნევით. წყლის ხარჯი დამოკიდებულია კონვერტერის ტევადობასა და ქშინის ზომაზე. წყლის ხედრითი ხარჯი შეადგენს $0,5-1,0$ კგ/ტ.წმ.

ჟანგბადის წნევა ქშინის საქშენის წინ ნაკლებია ჟანგბადის სადენში მის წნევაზე და იცვლება $0,4-0,8$ მგნ/მ² (4-8 ატ) ფარგლებში. გაქრევის ინტენსივობა შეადგენს $2,2-6,0$ მ³/ტ.წმ. ჟანგბადის გაქრევის საერთო ინტენსივობა $100-130$ ტ კონვერტერში უტოლდება 300 მ³/წთ.

ქშინიდან ჟანგბადის გამოდინების ხასიათი დამოკიდებულია საქშენის და ბუნიკის კონსტრუქციაზე. პრაქტიკაში გამოიყენება ერთჯავლიანი (ცილინდრული ან ლავალის შევიწროებადი საქშენები) და მრავალჯავლიანი ქშინები ლავალის საქშენებით.

საქშენში აირის გაფართოება ადიაბატური პროცესია გარემოსთან სითბოს მიმოცვლის გარეშე. საქშენიდან ჟანგბადის გამოდინების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით

$$W_0 = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad \text{მ/წმ}, \quad (3.6)$$

სადაც φ კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ხახუნის გავლენას და ადიაბატურობიდან გადახრას (ჩვეულებრივ $\varphi=0,95$);

k ადიაბატის მაჩვენებელია. ორატომიანი აირებისათვის $k=1,4$;

R აირების მუდმივაა. ნებისმიერი აირის 1 მოლისთვის ტოლია 260 ჯ/კგ-გრად [848 კკმ.მ/მოლი.გრად] ან 1 კგ უანგბადზე $26,5$ კკმ.მ/კგ-გრად;

P_1 და T_1 წნევა და ტემპერატურაა უანგბადის სადენში (საქშენში), საიდანაც შემოდის აირი;

P_2 საქშენის გარემომცველი არის წნევაა. კონვერტერში $P_2 = 0,1$ მგნ/მ² (1 ატ);

g სიმძიმის ძალის აჩქარებაა, მ/წმ².

ცილინდრულ და შევიწროვებად (ლავალის) საქშენებში განტოლება მართლდება იმ შემთხვევაში, როდესაც $P_2/P_1 \geq 0,528$ (ორატომიანი აირებისთვის).

როდესაც $P_2/P_1 = 0,528$, აირის გამოდინება ხდება კრიტიკული სიჩქარით (ბგერის სიჩქარით)

$$W_{0კრ} = \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} RT_1 = 3,38 \sqrt{RT_1} \quad (3.7)$$

კრიტიკული სიჩქარე უანგბადისათვის, როდესაც $T_1 = 298$ K, უტოლდება 300 მ/წმ.

აირსადენში P_1 წნევის მომატება იწვევს საქშენის გამოსასვლელ განივკვეთში წნევის და უანგბადის სიმკვრივის (γ) გაზრდას.

საქშენიდან გამოსული შეკუმშული ჭავლი იღებს დამატებით აჩქარებას. ჭავლის მაქსიმალური სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით

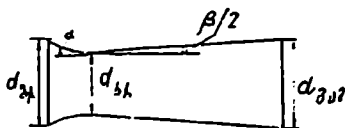
$$W_{აკს} = W_{0კრ} \left(1,715 - 1,353 \frac{P_2}{P_1} \right). \quad (3.8)$$

საქშენიდან გამოსული ჭავლი $10-15$ კალიბრის* მანძილზე განიცდის პულსაციას (გაიშვიათება-შეკუმშვას).

* კალიბრი ეწოდება საქშენიდან დაშორების მანძილის ფარდობას საქშენის შიგა დიამეტრთან.

ლაეალის საქშენიდან ჭავლი გამოდის ზებგერითი სიჩქარით. ჟანგბადის შემთხვევაში იგი შეადგენს 400–500 მ/წმ და ზოგჯერ მეტსაც.

ლაეალის საქშენის (სურ. 3.17) გაანგარიშებისთვის საჭიროა როგორც მისი სიგრძის, ისე კრიტიკული და გამოსასვლელი განივკვეთების ფართობების განსაზღვრა. გამოსათვლელად საწყისი მონაცემებია ქშინის დიამეტრი, საქშენის წინ ჟანგბადის სრული წნევა, ხვედრითი ხარჯი და სიმკვრივე (γ_0) მისი სისუფთავის გათვალისწინებით.



სურ. 3.17. ლაეალის საქშენი

ჟანგბადის სრული წნევა გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$P_{\text{საერთო}} = P_1 + \frac{W_1^2}{10^4 \cdot 2g} \cdot \gamma_1, \quad (3.9)$$

სადაც P_1 ჟანგბადის საქშენში ჟანგბადის წნევაა;

W_1 ქშინში ჟანგბადის შესვლის სიჩქარეა;

γ_1 ჟანგბადის სიმკვრივეა P_1 წნევაზე.

ამის შემდეგ ხდება ჟანგბადის კრიტიკული სიმკვრივის გამოთვლა ფორმულით

$$\gamma_{\text{კრ}} = \gamma_1 \left(\frac{P_{\text{კრ}}}{P_{\text{საერთო}}} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

ჟანგბადის კრიტიკული წნევისა და სიმკვრივის საშუალებით გამოვთვლით კრიტიკულ სიჩქარეს

$$W_{\text{კრ}} = 0,95 \sqrt{\frac{P_{\text{კრ}}}{\gamma_{\text{კრ}}} gk \cdot 10^4} \quad (3.11)$$

ჭავლის უწყვეტობის განტოლების გამოყენებით გამოვთვლით საქშენის კრიტიკული განივკვეთის ფართობს და დიამეტრს. ამისთვის ვიყენებთ ფორმულას

$$F_{\text{კრ}} = \frac{v_0 \cdot \gamma_0}{w_{\text{კრ}} \cdot \gamma_{\text{კრ}}},$$

საიდანაც

$$d_{\text{კრ}} = \sqrt{4F_{\text{კრ}}/\pi}. \quad (3.12)$$

კონფუზორის* სიგრძეს გამოეთვლით შემდეგი ფორმულის საშუალებით

$$\ell_1 = \frac{d_i - d_{კრ}}{2tg\alpha}, \quad (3.13)$$

სადაც d_i საქშენის დიამეტრია;

$d_{კრ}$ კრიტიკული დიამეტრია;

α კონფუზორის ღერძსა და მსახველს შორის არსებული მახვილი კუთხეა. α აიღება 15–30°-ის ფარგლებში.

ამის შემდეგ ხდება ტექნიკური ჟანგბადის მაქსიმალური სიჩქარის გამოთვლა

$$W_{მავს} = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{P_{მავს}}{\gamma_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{საერთ.}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3.14)$$

სადაც P_2 ჟანგბადის წნევაა გამოსასვლელ კვეთებში და აიღება 1,2 ატ ტოლად. ჟანგბადის სიმკვრივე ამ წნევაზე იქნება

$$\gamma_2 = \gamma_0 \times 1,2 : 1,008, \quad (3.15)$$

სადაც 1,008 გარემოს წნევაა, ატ.

საქშენის გაფართოებული ნაწილის განიკვეთის ფართობი და დიამეტრი გამოითვლება ჭავლის უწყვეტობის განტოლების საშუალებით

$$F_{ფ} = \frac{V_c \gamma_c}{W_{მავს} \gamma_2}; \quad d_{ფ} = \sqrt{\frac{4F_{ფ}}{\pi}} \quad (3.16)$$

დიფუზორის** სიგრძის საანგარიშოდ გამოიყენება ფორმულა

$$\ell_2 = \frac{d_{ფ} - d_{კრ}}{2tg\beta}, \quad (3.17)$$

სადაც β – დიფუზორის მსახველსა და ღერძს შორის არსებული მახვილი კუთხეა. მისი მნიშვნელობა იცვლება 4–7°-ის ფარგლებში.

საქშენის საერთო სიგრძე იქნება

$$\ell_0 = \ell_1 + \ell_2 \quad (3.18)$$

ქშინში შემავალი ჟანგბადის წნევის საანგარიშოდ გამოიყენოთ ფორმულა

* რედაქტორისაგან: კონფუზორი ეწოდება საქშენის შევიწროებად ნაწილს.

** რედაქტორისაგან: დიფუზორი ეწოდება საქშენის გაფართოებად ნაწილს.

$$P^2 = P_1^2 + 0,013017\lambda \frac{v_{\text{სივ}}^2}{d^5} \cdot \gamma_0 \ell \quad (3.19)$$

სადაც P ტექნიკური ჟანგბადის ჭარბი წნევაა ქშინში შესვლისას, ატ;

d ქშინის შიგა დიამეტრია მ;

γ_0 ტექნიკური ჟანგბადის სიმკვრივეა ნორმალურ პირობებში, კგ/მ³;

$v_{\text{სივ}}$ ტექნიკური ჟანგბადის საათობრივი ხარჯია, მ³/სთ;

P_1 ტექნიკური ჟანგბადის ჭარბი წნევაა ქშინიდან საქშენში შესვლისას, აიღება 13 ატ ტოლად;

λ ხახუნის კოეფიციენტი, ლითონის მიღებისათვის $\lambda=0,04$;

ℓ ქშინის სიგრძეა, რომელსაც იღებენ 5,5 მ-ის ტოლად;

მოყვანილი მეთოდით შეიძლება მრავალსაქშენიანი ქშინების ანგარიშიც.

3.2.5. ქშინის ანგარიში

ჟანგბადის ქშინის ანგარიში ჩავატაროთ 150 ტ ტევალობის კონვერტერისათვის. ქშინის სიგრძე ავიღოთ 5,5 მ, ხოლო შიგა დიამეტრი 0,12 მ-ის ტოლი. პრაქტიკული მონაცემების მიხედვით ჟანგბადის ხვედრითი ხარჯი საშუალოდ შეადგენს 60 მ³/ტ, ხოლო გაქრევის ინტენსიურობა – 6 მ³/ტ წთ.

ჟანგბადის საერთო ხარჯი დნობაზე იქნება $60 \cdot 150 = 9000$ მ³, ჟანგბადის წუთობრივი ხარჯი – $6 \cdot 150 = 900$ მ³/წთ, ხოლო წამობრივი ხარჯი – $900 \cdot 60 = 15$ მ³/წმ, გაქრევის ხანგრძლივობა კი – $9000 \cdot 900 = 10$ წთ.

ანგარიში ჩავატაროთ ერთსაქშენიანი ქშინისთვის ლავალის საქშენიანი ბუნიკით.

საქშენის შესასვლელში ტექნიკური ჟანგბადის ჭარბი წნევა მივიღოთ 13 ატ-ს ტოლად. მაშინ მისი წამური მოცულობა იქნება $v_{\text{წ}} = 15 \cdot 1,000 \cdot 13 = 1,154$ მ³/წმ,

სადაც 1,000 გარემოს წნევაა, ატ.

გაქრევისათვის გამოიყენება ტექნიკური ჟანგბადი, რომლის სისუფთავეა 99,5 % და 0,5 % N_2 . ბერვის* ასეთი სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში (0 °C ტემპერატურისა და 1 ატ წნევისას) იქნება

* რელაქტორისაგან: ტერმინი “ბერვა” (არსებითი სახელი) ნიშნავს შებერვისას გამოყენებულ აირს ან აირების ნარეულს.

$$\gamma_0 = \frac{32}{22,4} \cdot 0,995 + \frac{28}{22,4} \cdot 0,005 = 1,427 \text{ კგ/მ}^3;$$

ტექნიკური უანგბადის სიმკვრივე 13 ატ ჰარბი წნევისა და 25°C ტემპურატურის პირობებში იქნება

$$\gamma_1 = \frac{1,427 \cdot 13}{\left(1 + \frac{25}{273}\right) \cdot 1,000} = 16,99 \text{ კგ/მ}^3;$$

ქშინის ფართობი

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4} = 0,0113 \text{ მ}^2$$

საქშენში შესვლისას ტექნიკური უანგბადის სინქარე

$$w_1 = 1,154 \cdot 0,0113 = 102,12 \text{ მ/წმ.}$$

ტექნიკური უანგბადის საერთო ჰარბი წნევა

$$P_b = P_1 + \frac{w_1^2}{10^4 2g} \gamma_1 = 13 + \frac{102,2^2 \cdot 16,99}{10^4 \cdot 2 \cdot 9,81} = 13,93 \text{ ატ};$$

კრიტიკული ჰარბი წნევა

$$P_{cr} = 0,528 \cdot P_b = 0,528 \cdot 13,93 = 7,36 \text{ ატ};$$

ტექნიკური უანგბადის კრიტიკული სიმკვრივე

$$\gamma_{cr} = \gamma_1 \left(\frac{P_{cr}}{P_b} \right)^{\frac{1}{k}} = 16,99 \cdot \left(\frac{7,36}{13,93} \right)^{1/1,4} = 10,77 \text{ კგ/მ}^3;$$

კრიტიკული სინქარე

$$w_{cr} = \varphi \sqrt{\frac{P_{cr}}{\gamma_{cr}} g k \cdot 10^4} = 0,95 \sqrt{\frac{7,36}{10,77} \cdot 9,81 \cdot 1,4 \cdot 10^4} = 291 \text{ მ/წმ};$$

საქშენის კრიტიკული განიეკვეთის ფართობი

$$F_{cr} = \frac{v_{cr} \cdot \gamma_0}{w_{cr} \cdot \gamma_{cr}} = \frac{15 \cdot 1,427}{291 \cdot 10,77} = 0,0068 \text{ მ}^2,$$

$$\text{ხოლო } d_{cr} = \sqrt{\frac{4F_{cr}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0068}{3,14}} = 0,093 \text{ მ} = 93 \text{ მმ}.$$

კონფეუსორის სიგრძის გამოსათვლელად კუთხე მის მსახველსა და ღერძს შორის მივიღოთ 15°-ის ტოლად. მაშინ

$$l_1 = \frac{d_1 - d_{\text{კრ}}}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{120 - 93}{2 \cdot \operatorname{tg} 15} = 50 \text{ მმ.}$$

საქმენის გაფართოებული ნაწილიდან ჭაელის გამოსვლის სინქარე

$$w_{\text{ჩაქის}} = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{\gamma_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_{\text{საერთო}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} =$$

$$= 0,95 \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot \frac{13,93 \cdot 10^4}{16,99} \left[1 - \left(\frac{1,2}{13,93} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 502 \text{ მ/წმ.}$$

უანგბადის სიმკვრივე $P_2=1,2$ ატ ჭარბი წნევისას
 $\gamma_2=1,427 \cdot 1,2 : 1,000 = 1,712 \text{ კგ/მ}^3$.

საქმენის გაფართოებული ნაწილი განიკვეთის ფართობი

$$F_{\text{ჩ}} = \frac{15 \cdot 1,427}{502 \cdot 1,712} = 0,0249 \text{ მ}^2.$$

ხოლო დიამეტრი

$$d_{\text{ჩ}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ჩ}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0249}{3,14}} = 0,178 \text{ მ ანუ } 178 \text{ მმ.}$$

დიფუზორში კუთხე β მივიღოთ 7° -ის ტოლად. მაშინ მისი სიგრძე

$$l_2 = \frac{d_{\text{ჩ}} - d_{\text{კრ}}}{2 \operatorname{tg} \beta} = \frac{178 - 93}{2 \cdot \operatorname{tg} 7} = 346 \text{ მმ.}$$

საქმენის საერთო სიგრძე

$$l_0 = l_1 + l_2 = 50 + 346 = 396 \text{ მმ.}$$

ტექნიკური უანგბადის ჭარბი წნევა (P) ქმინში შესვლისას ტოლია

$$P^2 = P_1^2 + 0,01317 \cdot \lambda \frac{v_{\text{სა}}^2}{d^5} \cdot \gamma_0 \cdot l =$$

$$= 169 + 0,01317 \cdot 0,04 \cdot \frac{(15 \cdot 3600)^2}{12^5} \cdot 1,427 \cdot 5,5 = 203 \text{ ატ}^2.$$

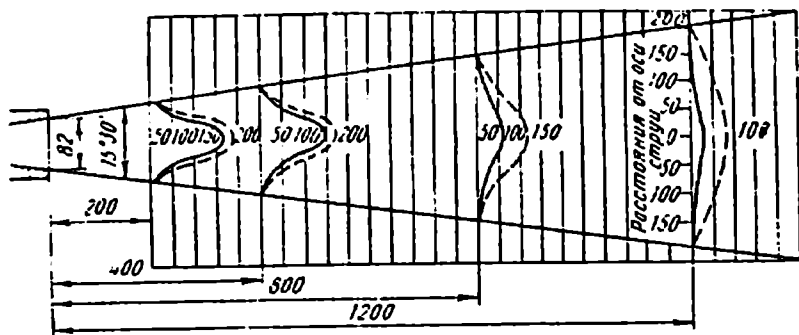
$$P = \sqrt{203} = 14,23 \text{ ატ.}$$

$$P = 14,23 \text{ ატ.}$$

3.2.6. უანგბადის ჭავლის აეროდინამიკა

უანგბადის ჭავლი კონვერტერის ზემოდან გაქრვის დროს (როდესაც ქშინი არ არის ჩაძირული ლითონში) განიცდის გარემომცველი აირადი გარემოს ზემოქმედებას. თუ მასთან ქიმიურ ურთიერთქმედებას არა აქვს ადგილი, გარკვეული სინქარით მოძრაობის უანგბადის ჭავლი განიცდის გარემომცველი აირადი გარემოსაგან დამამუხრუჭებელ ზეგავლენას და მისი სინქარე მცირდება.

საერთოდ, თავისუფლად მოძრაობის ჭავლი დაყოფილია სამ უბნად: საწყისი, გარდამავალი და ძირითადი უბნები. ჭავლის დამამუხრუჭებელი ნაწილაკები გარემოს ნაწილაკებთან ერთად წარმოქმნის ტურბულენტურ სასაზღვრო ფენას. საწყის უბანზე ამ ფენის სისქე ნულის ტოლია და ქშინიდან დაშორების კვადრატულად იზრდება. ტურბულენტური ფენის სისქის ზრდასთან ერთად მცირდება მუდმივი სინქარის ბირთვი, ჭავლის მასა იზრდება, სინქარე მცირდება, ხოლო ჭავლის მოძრაობის რაოდენობა უკველელი რჩება (სურ. 3.18).



სურ. 3.18 უანგბადის ჭავლის სქემა. მთლიანი ხაზები დინამიკური დაწნევა; წვეტილი ხაზები - სინქარეთა ეპიურები.

დერძული სინქარის შემცირება ჩაძირული ჭავლისათვის გამოიხატება შემდეგი ფორმულით:

$$\frac{W_x}{W_0} \left(\frac{x}{d_0} \right) = 7,2 \left(\frac{x}{d_0} \right)^{-0,1} = B, \quad (3.20)$$

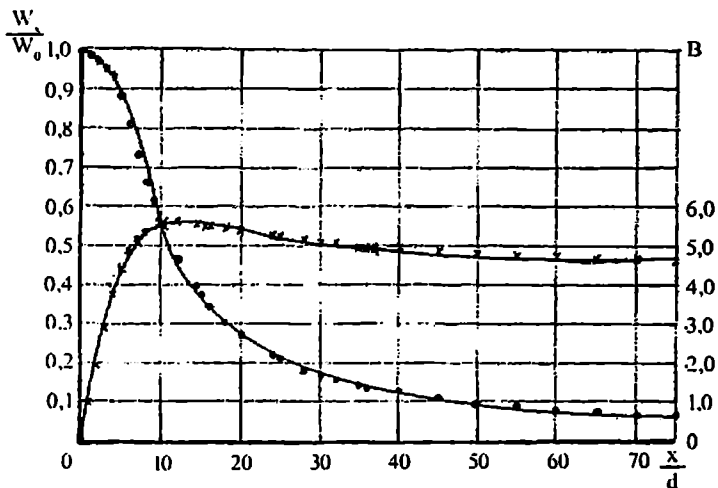
სადაც W_0 და W_x ჭავლის დერძული სინქარეებია საქშენის განივკვეთში და მისგან x მანძილზე;

x დაშორებაა საქშენიდან;

d საქმენის დიამეტრია;

B სინქარის მიღევის მრუდის გეომეტრიული მახასიათებელია (B=4,6-5,6).

ეს მახასიათებელი გეინვენებს რამდენი კალიბრის (x/d_0) შემდეგ შეადწევეს გარემომცველი აირი ჭავლის დერძამდუ და დაიწება დერძული სინქარის შემცირება ჭავლისა და გარემოს იმპულსთა რაოდენობის ცვლილების შედეგად. გრაფიკულად დერძული სინქარის ცვლილება წარმოდგენილია სურათზე 3.19.



სურ. 3.19. ჯანგბადის ჭავლის დერძული სინქარის ცვლილება

აირის ჭავლის მოძრაობის ხასიათი იცვლება ლითონთან შეხებისას. გარკვეული სინქარით (კინეტიკური ენერგიით) მოძრავი ჭავლი გარკვეულ სიღრმეზე შეიჭრება თხევად ლითონში. არასიმბილირებელი აირის ჭავლის ლითონში შეჭრის სიღრმე გამოითვლება ფორმულით

$$h = n \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_m} \cdot \frac{W_x^2}{2g}, \quad (3.21)$$

სადაც h ჭავლის წაძირვის სიღრმეა, მ;

n სქაროსნული დაწნევის შეღწევის კოეფიციენტი;

γ_a და γ_m აირის და ლითონის სიმკვრივეა, კგ/მ³;

W_x ჭავლის დერძული სინქარეა სითხის ზედაპირზე, მ/წმ;

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ²;

სითხეში წაძირვისას ჭავლი განიცდის დამუხრუჭებას ხახუნის და საწინააღმდეგოდ მოქმედი ამომგდები ძალების გავლენით.

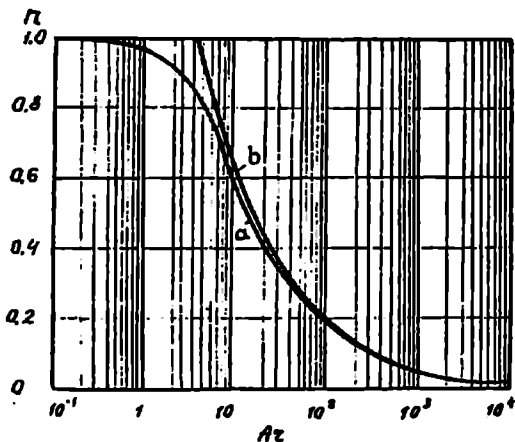
ამიტომ ჰაელის ნქაროსნული დაწნევის შეღწევის კოეფიციენტს გამოხატავენ არქიმედის კრიტერიუმით

$$n = f(Ar) = f\left(\frac{\gamma_0 \cdot W_x^2}{g(\gamma_{\text{ლ}} - \gamma_0) d_x}\right) = f\left(\frac{\gamma_0 \cdot W_x^2}{g \gamma_{\text{ლ}} d_x}\right), \quad (3.22)$$

სადაც d_x ჰაელის დიამეტრია სითხესთან შეხებისას, მ. კმპირიული ფორმულით

$$n = \frac{2}{\sqrt{Ar}}. \quad (3.23)$$

ეს ფორმულა კარგად ემთხვევა ცდების საფუძველზე დაღებულ დაშოკიდებულებას, როდესაც $Ar > 10$ (სურ. 3.20).



სურ. 3.20 არქიმედის კრიტერიუმის (Ar) დაშოკიდებულება ნქაროსნული დაწნევის შეღწევის კოეფიციენტზე (n)

a - ექსპერიმენტული; b - ფორმულით $n = \frac{2}{\sqrt{Ar}}$

გაქრევის ნეულებრივი პირობებისათვის $\frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{ლ}}} = \frac{1,4}{7000} = 5000$;
 $W_x = 200$ მ/წმ; $d_x = 0,08$ მ.
 მაშინ,

$$Ar = \frac{200^2}{5000 \cdot 9,81 \cdot 0,08} = 10,19. \quad (3.24)$$

ამგვარად, ლითონში აირის შეჭრის სიღრმე გამოითვლება ფორმულით

$$h = \sqrt{\frac{\gamma_{\Delta}}{g\gamma_{\text{ლ}}}} d_x \cdot W_x. \quad (3.25)$$

მიღებული დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ ლითონში ჟანგბადის შეჭრის სიღრმე (ქიმიური ურთიერთქმედების გაუთვალისწინებლად) დამოკიდებულია ჭავლის დიამეტრზე და ლერძულ სინქარეზე სითხესთან შეხვედრის ადგილში.

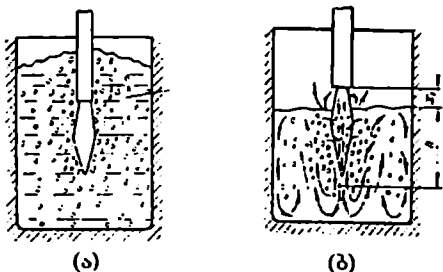
კონვერტერის ლითონური აბაზანა ინტენსიურად მოძრაობს ორი ფაქტორის — ჟანგბადის ჭავლისა და წარმოქმნილი ნახშირჟანგის ბუშტულების გავლენით. საქმენიდან ჟანგბადის გამოსვლის შემდეგ ლითონთან შეხებისას, ევრტიკალურად მიმართული ჭავლის ძალაა 30–50 კგძ*. V მოცულობის ნახშირჟანგის ბუშტულები დაახლოებით ერთნაირი სინქარით მოძრაობს ფოლადში ქვემოდან ზემოთკენ და ავითარებს ლითონზე მოქმედ არქიმედის ძალას

$$P = V \cdot (\gamma_{\text{ლ}} - \gamma_{\text{გ}}) \approx V \cdot \gamma_{\text{ლ}}, \quad \text{კგძ}. \quad (3.26)$$

სადაც $\gamma_{\text{გ}}$ და $\gamma_{\text{ლ}}$ აირისა და ლითონის კუთრი წონებია (სიმკვრივე), კგძ/მ³.

ამრიგად, მოძრავი ბუშტულებით გამოწვეული და თხევადი ლითონის აბაზანაზე მოქმედი არქიმედის ძალა გამოდევნილი სითხის წონის ტოლია. მაგალითად, 20-ტონიან კონვერტერში ნახშირჟანგის ბუშტულების გამოყოფით გამოწვეული დუღილის შედეგად აბაზანის დონე მალლა იწვეს 20 %-ით. ამ დროს მოძრავი ბუშტულები აბაზანაზე მოქმედებს 0,2·20=4 ტ ძალით. საბოლოოდ მივდივართ დასკვნამდე, რომ აბაზანაზე ნახშირჟანგის მოძრავი ბუშტულების ზემოქმედების ძალა დაახლოებით ასჯერ აღემატება ჟანგბადის ჭავლის ზემოქმედების ძალას.

ლითონთან ჟანგბადის ჭავლის შეხებისა და მისი ჰიდროდინამიკის შესწავლა უშუალოდ საწარმოო პირობებში პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამის გამო ამ პროცესებს სწავლობენ სხვადასხვა სამოდელს სითხეზე. ასეთი კვლევის შედეგები წარმოდგენილია სურათზე 3.21. როგორც ამ სურათიდან ჩანს, აირის ჭავლის სითხეზე ზემოქმედების ხასიათი დამოკიდებულია სითხის მიმართ საქმენის მდებარეობაზე.



სურ. 3.21. ლითონზე ნაძირული (ა) და თავისუფალი (ბ) ჭავლის მოქმედების სქემა

* რელაქტორისაგან: 1 კგძ ≈ 9,8 ნ.

3.2.7. ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი ზედა შებერვით

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ჟანგბადით თუჯის ზემოდან გაქრევამ მთილო „ლდ-პროცესის“ სახელწოდება. ამ ხერხის მიხედვით კონვერტერში ნახსმული თუჯის ზედაპირზე 4-12 ატ ჭარბი წნევით შეჰყავთ ჟანგბადი სპილენძის ბუნებით დაბოლოებული რკინის მთლისაგან დამზადებული საქშენით, რომელიც ცივდება წყლით. ზემოდან შებერვის ასეთი ხერხის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ აღარაა საჭირო ფსკერში ჩადგმული კერამიკული ქშინები და სითბოს საგრძნობი სიჭარბე, რაც გამოწვეულია ბალასტური (უსარგებლო) ახოტის გამორიცხვით, ეს კი საშუალებას იძლევა გადამუშავდეს სამარტენე თუჯები დნობის დროს მადნის, ჯართისა და კირის დამატებითაც კი.

მინარევეების ამოწვა „ლდ-პროცესში“ ტარდება სწრაფად და მშვიდად. სილიციუმი მთლიანად იჟანგება 1-2 წუთში. მანგანუმი ინტენსიურად იწვის 7-8 წუთს. შემდეგ, ტემპერატურის აწვეისას, იგი იწვებს ადღვენას, ხოლო დნობის ბოლოს (მე-16-18 წუთებზე) კი, ხელახლა იჟანგება. ნახშირბადის დაჟანგვა იწვება პირველი წუთებიდანვე და ტემპერატურის სწრაფი ზრდის შედეგად ამ პროცესის სინქარე მე-6 წუთზე აღწევს მაქსიმუმს, მაგრამ დნობის ბოლო 3-4 წუთში, როდესაც ნახშირბადის რაოდენობა კლებულობს, ისევე მცირდება.

დნობის მსვლელობისას იკლებს გოგირდის კონცენტრაციაც 0,03 %-ის დონემდე მზა ფოლადში. ზემოდან ჟანგბადის მიწოდებისას მოსალოდნელია, რომ ლითონს SO_2 -ის სახითაც მოშორდეს გოგირდი, თუმცა ფაქტიურად მხოლოდ მისი საერთო რაოდენობის არა უმეტეს 7-15 %-სა სცილდება ამ გზით.

„ლდ-პროცესისათვის“ დამახასიათებელია ფოსფორის ჟანგვის ადრე დაწყება, რაც 4-6 წუთში აღწევს მაქსიმუმს. ზედმეტი ბერვის პერიოდი არა გვაქვს, რადგანაც ფოსფორი და გოგირდი ერთად იწვის. ფოსფორის ასეთი ქმედება კონვერტერში აქტიური რკინა-კირიანი წილის სწრაფი წარმოქმნის შედეგია. ჟანგბადის ჭავლისა და ლითონის შეხების ადგილას მინარევეები ძალზე მისაფრად იჟანგება. განსაკუთრებით იწვის რკინა. ყოველივე ამის გამო აბაზანის ამ ნაწილში ტემპერატურა საგრძნობლად იზრდება - დაახლოებით 2000-2500 °C-მდე.

ასეთი მაღალი ტემპერატურა აჩქარებს კირის გახსნას, რასაც ხელს უწყობს აგრეთვე, წიდაში რკინის ქვეჟანგის დიდი კონცენტრაცია, რომელიც მე-8 წუთისათვის აღწევს დაახლოებით 25-30 %-ს.

ვინაიდან რკინის ქვეჟანგიც მონაწილეობს დაჟანგვაში, ნახშირბადის ამოწვა ხდება არა მარტო შებერილი ჟანგბადის ხარჯზე, არამედ წიდაში მეოფი რკინის ქვეჟანგითაც, ამიტომ ამ უკანასკნელის რაოდენობა წიდაში მცირდება და ნახშირბადის ამოწვის დასასრულისათვის დადის 12 %-მდე.

ტემპერატურის გაზრდის შედეგად, ფოსფორის აღდგენის თავიდან აცილების მიზნით, მე-12-14 წუთზე, როცა მისი ამოწვის სინქარე შენელებდა, კონვერტერში შეაქვთ ჯართისა და კირის დამატებითი კერძები. ჯართის საერთო რაოდენობა ძალზე დიდია – ჩანატვირთის 17-27 %. დამატებული კირის რაოდენობა, თომასის პროცესთან შედარებით, უფრო ნაკლებია – ჩანატვირთის 4-6 %. თომასის პროცესთან შედარებით ასევე ნაკლებია წილის რაოდენობაც, რომლის საბოლოო შედგენილობაა (მასური %):

SiO ₂	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	FeO	Fe ₂ O ₃
10-18	30-40	1,0-5,0	10-15	1,0-1,8	10-12	<4

„ლდ-პროცესით“ გამოდნობილი ფოლადი მცირე რაოდენობით შეიცავს აზოტს. ჟანგბადის 98 %-იანი სისუფთავისას (0,5-1,0 % N და 1,0-1,5 % Ar) მიიღება 0,002-0,004 % აზოტის შემცველი ფოლადი. ჟანგბადის სისუფთავის შემცირებისას აზოტის ოდენობა ლითონში იზრდება. შემჩნეულია, რომ კონვერტერის ყელის სიგანის შემცირებით მცირდება ფოლადში აზოტის რაოდენობა. ეს აიხსნება ალბათ იმით, რომ ძალზე მაღალი ტემპერატურის დროს, რომელიც მიიღება ჟანგბადის ჭაყლის ლითონთან შეჯახების ადგილზე, აზოტის მცირე რაოდენობაც კი, რომელიც შემოაქვს შემოწოვილ ჰაერს, ხარბად იხსნება ლითონში. ჟანგბადის საშუალო ხარჯი პროცესში შეადგენს 60 მ³/ტ კაზმზე. ჟანგბადის გამოყენების კოეფიციენტი 90 %. დნობის ხანგრძლივობა პერიოდების მიხედვით შემდეგია:

ჯართის ჩატვირთვა	2 წთ
თუჯის ჩახხმა	1 წთ
კირის ჩატვირთვა	1 წთ
გაქრევა	22 წთ
წილის მოხდა და სინჯის აღება	3 წთ
ფოლადის გამოსემა	2 წთ
მომზადება შემდეგი დნობისათვის	3 წთ
სულ	34 წუთი.

დნობის ხანგრძლივობა ჟანგბადით ზემოდან შებერვისას რამდენადმე მეტია, ვიდრე ფსკერიდან შებერვის დროს. ფოლადის გამოსავალიც ნაკლებია – 88,5 %. მინარევეების ნაშწია 7,5 %, დანარჩენი 4 % მექანიკური დანაკარგია, რომლის დიდ ნაწილსაც

მტვერი შეადგენს. კონვერტერიდან გამოყოფილ მტვერში 65–70 % რკინისა და მანგანუმის ჟანგეულებია. მურა ფერის მტერის დიდი რაოდენობით გამოყოფა წარმოადგენს „ლდ-პროცესის“ თავისებურებას და ნაკლს. მტვერი შედგება 50 ნმ* ზომის ნაწილაკებისაგან. ასეთივე მტვერი წარმოიქმნება მარტენის ღუმელში თხევადი აბაზანის ჟანგბადით გაქრვისას. მტერის ასეთი ინტენსიური გამოყოფა სუდაპირული შექერვისას აიხსნება რკინისა და მანგანუმის აორთქლებით ჟანგბადისა და ლითონის შეხების ადგილას კანცითარებული მაღალი ტემპერატურის გამო. მტერის დამჭერი მოწყობილობის გამოყენება ართულებს კონვერტერების მშენებლობას.

გადაუტრულ პრობლემას წარმოადგენს კონვერტერის ამონაგის მედეგობის გაზრდა. იგი ცველება არათანაბრად, ყველაზე სწრაფად კი – კონვერტერის სიმაღლის შუა ნაწილში (წილის სარტყლის ზონაში), განსაკუთრებით თუჯის ჩასხმის მხარეს. დონაციის ქარხანაში, სადაც მიაღწევს ამონაგის მაქსიმალურ მედეგობას, თავდაპირველად 350 მმ სისქის მუშა ფენას აკეთებდნენ მაგნეზიტ-ფისიანი აგურისაგან, რომლის მედეგობა იყო 230 დნობა. მაღალი თერმომედეგობის მაგნეზიტის აგურის გამოყენებითა და წილის სარტყლის ზონაში ამონაგის სისქის გაზრდით მედეგობამ მიაღწია 430 დნობას. იმის გათვალისწინებით, რომ სპეციალური მაგნეზიტის აგური ძალზე ძვირია, ხოლო ამონაგის ნაცვეთს მსხლისმაგვარი ფორმა აქვს, წამოყენებული იყო წინადადება ამ ნაცვეთის შესაბამისი კონფიგურაციის ამონაგის დამზადებაზე. ავსტრიაში მუშაობდა სფერული კონსტრუქციის კონვერტერი.

1955 წ. დოფასკოს ფირმის ქარხანაში, კამბლტონში (კანადა), ააგეს 40-ტონიანი კონვერტერი, რომელიც მუშაობდა „ლდ-პროცესით“ სამარტენე თუჯზე. ეს თუჯი ავსტრიულისაგან განსხვავდებოდა მანგანუმის ნაკლები კონცენტრაციით, სილიციუმის მეტი და გოგირდის ძალზე მცირე შემცველობით. წარმატებით გამოიყენებოდა აგრეთვე 0,18 % P და 2 % Si შემცველი თუჯი. აღსანიშნავია, რომ მიღებული ფოლადი ბევრად ნაკლებ ფოსფორს შეიცავდა ხედა ზღერულ დასაშვებ ნორმასთან შედარებით, ხოლო სილიციუმის დაჟანგვის შედეგად გამოყოფილი ჭარბი სითბოს უტილიზაცია ხდებოდა ჯართის დამატებით. ჯართის ხარჯის ცვლილებით შეიძლებოდა ტემპერატურის რეჟიმის ზუსტი რეგულირება. კირის ხარჯი იყო 7 %-მდე და წილის ფუძიანობა აღწევდა სამამდე. აქტიური წილის წარმოქმნის მიზნით კონვერტერში

* რედაქტორისაგან: ნმ ნანომეტრი; 1 ნმ=10⁻⁹ მ.

შექონდათ 1 % ხენჯი და 45-90 კგ მდნობი შპატი ერთ დნობაზე. წილის დაჟანგულობა მეტი იყო, ვიდრე თომასის პროცესში, მაგრამ არ აღემატებოდა მარტენის წილის დაჟანგულობას. მზა ფოლადი შეიცავდა ძალზე მკირე რაოდენობით აზოტს. 99,2 % სისუფთავის ჟანგბადზე მუშაობისას მზა ფოლადში იყო 0,0036 % აზოტი, ხოლო 99,4 %-ის შემთხვევაში კი - 0,0025 % შესაბამისად.

საბჭოთა კავშირში 1954 წ. ნოვოტულის ქარხანაში ააგეს „ლდ-პროცესით“ მომუშავე კონვერტერი. შემდეგ ასეთი კონვერტერი ააგეს ენაკიევის ქარხანაშიც. კონვერტერი ამოგებული იყო ქრომომაგნეზიტის აგურით. გამოიყენებოდა სამარტენე გადასამუშავებელი თუჯი. იგი შეიცავდა ნაკლებ სილიციუმსა და მეტ გოგირდს. გაცივების ოპერაციისათვის გამოიყენებოდა რკინის მადანი და ჯართი. ისინი შექონდათ კონვერტერში შებერვამდეც და შებერვის პროცესშიც. აქტიური თხევადენადი რკინა-კირიანი წილის მისაღებად, მადნის გარდა, იყენებდნენ 5-7,5 % კირს და 0,5-1,2 % ბოქსიტს. ცდებით დაადგინეს, რომ პროცესის სვლისას, ნახშირბადის ინტენსიური ამოწვის პირობებში, მკირდება წილის დაჟანგულობა, რადგანაც რკინის ქვეჟანგი წილიდან მონაწილეობს ნახშირბადის ამოწვაში. წილაში რკინის ქვეჟანგის წილის შემცირება იწვევდა მისი აქტიურობის კლებას და აფერხებდა ფოსფორის დროულ მოშორებას. ეს განსაკუთრებით შეიმჩნეოდა სარელსე ფოლადის გამოდნობისას, როცა ფოსფორის მოშორების სინქარე წინ უნდა უსწრებდეს ნახშირბადის ამოწვის სინქარეს, რათა 0,5-0,7 %-იანი ნახშირბადის კონცენტრაციის შემთხვევაში ფოსფორის შემცველობა 0,05 %-ზე ნაკლები იყოს.

წილის დაჟანგულობის გაზრდის ცდამ მადნისა და ჟანგბადის ხარჯის გაზრდით ნაყოფი არ გამოიღო, რადგანაც ეს იწვევდა ნახშირბადის ამოწვის პროცესის ზედმეტ ინტენსიფიკაციას. სასურველ შედეგს მიაღწიეს ზედაპირული შებერვის გამოყენებით, რისთვისაც შემამცირეს ჟანგბადის წნევა, მისი ხარჯი და მაღლა ასწიეს ქშინი, ე.ი. გაზარდეს მანძილი ლითონის ზედაპირსა და ქშინს შორის. ამან გამოიწვია აბაზანის სიდრმეში ჟანგბადის შეჭრისა და ნახშირბადის ამოწვის სინქარის შემცირება. საგრძნობლად გაძლიერდა რკინის ჟანგვაც. მიღებული რკინის ჟანგულები ზრდიდა წილის აქტიურობას და აჩქარებდა დეფოსფორაციას.

მეორე სიახლეს სარელსე ფოლადის გამოდნობის დროს წარმოადგენდა პირველი მაღალკაემიწიანი წილის მოხდა და ახალი წილის შექმნა 1,5 % კირის და 0,5 % ბოქსიტის დამატებით. აქაც ნაჩვენები იყო დამოკიდებულება ჟანგბადის სისუფთავესა და ფოლადში

აზოტის რაოდენობას შორის. უანგბადის ხარჯი ტონა ფოლადზე იყო 50–60 მ³, თხევადი ლითონის გამოსავალი კი – 87–88 %.

1956 წ. „ლდ-პროცესი“ საწარმოო მასშტაბით გამოიყენებოდა კეტროუსკის ქარხანაში. კონვერტერის ამონაგი მზადდებოდა პერიკლაზურ-შპინელიდური აგურისაგან (69 % MgO და 10 % Cr₂O₃), უანგბადის სისუფთავე იყო 95–99 %, ჭარბი წნევა – 7 ატ. ქშინი (სპილენძის ბუნიკიანი 12 მმ დიამეტრის საქშენით) ვიდეზობდა წყლით. თუჯის ჩასხმის წინ კონვერტერში შეჰქონდათ 4,5–6 % კირი, 2–3 % მადანი და 1,0–1,5 % ბოქსიტი. ყველა მინარევის დაუანგვა იწყებოდა ერთად. მე-4–5 წუთზე ამოიწვა სილიციუმისა და მანგანუმის 80 %, ფოსფორის 30 % და გოგირდის 25 %. დნობების თითქმის ნახევარში (55 %) მიიღებოდა კაჟმიწით მდიდარი წილა (21 % SiO₂), რომელიც 17 %-ზე დაბლა არ ეკვმოდა. პირველ პერიოდში ქშინის დაშორება წყნარი ლითონის ზედაპირიდან იყო 800 მმ. ეს უზრუნველყოფდა წილის სწრაფ წარმოქმნას. ლითონის გასაცივებლად, მადნის გარდა, იყენებდნენ წყალს, რომელსაც გააშხეფებდნენ (გააფრქვევდნენ) უანგბადით. ამით უსუსტად არეგულირებდნენ ლითონის ტემპერატურას, მკვირდებოდა მტურის წარმოქმნა და იზრდებოდა ამონაგის მედეგობა. წყლის მიწოდება იწყებოდა შებურვის დაწყებიდან 1 წუთის შემდეგ 20 ლ/წთ სინქარით. პირველი პერიოდის დამთავრებამდე 1 წუთით ადრე წყლის მიწოდებას წყვეტდნენ და ქშინს სწევდნენ 900–1000 მმ სიმაღლეზე. ეს იწყება წილის აქაფებას და აადვილებდა მის მოხდას. ახალი წილის შესაქმნელად კონვერტერში შეჰქონდათ 1,5–2,0 % კირი და 0,5 % ბოქსიტი. მეორე პერიოდის დაწყებიდან 1 წუთის განმავლობაში ქშინი 900–1000 მმ სიმაღლეზე იყო. ეს ანქარებდა წილის წარმოქმნელების გადნობას. შემდეგ ქშინს დაუშვებდნენ 800 მმ სიმაღლემდე, ხოლო მეორე პერიოდის დაწყებიდან 2 წუთის შემდეგ მიაწოდებდნენ წყალს 20 ლ/წთ სინქარით. წყლის მიწოდებას წყვეტდნენ დნობის დამთავრებამდე 4 წუთით ადრე. უანგბადის ხარჯი იყო 60 მ³/ტ, აზოტის რაოდენობა ფოლადში იკვლევებოდა 0,003–0,010 %-ის ფარგლებში. ამონაგის მედეგობამ 80–85 დნობიდან აიწია 135–140 დნობამდე. დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 4 წუთით.

კონვერტერის ამონაგის მედეგობის გაზრდის მიზნით დაიწყეს მისი დამზადება დილომიტისა და ფისის ნარევისაგან.

3.2.8 მაღალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავება ზედა გაქრევით მომუშავე კონვერტერებში ნაჭროვანი კირის გამოყენებით

გერმანიაში ხაგენ-ხასაში „კლეკერ ხიუმენერის“ ქარხანაში შეიმუშავეს ჟანგბადის ზემოდან გაქრევის მეთოდი ნაჭროვანი კირის გამოყენებით – ბუფერ-წილური პროცესი. დნობის დროს ჟანგბადის შეხება ლითონთან შესწავლილია. ამისთვის გამოიყენება სპეციალური ფორმის საქმენი, რეგულირდება აბაზანის ზედაპირიდან მისი დაშორების მანძილი და იკვლება ჟანგბადის წნევა.

გაქრევის დაწყების წინ კონვერტერში ნატვირთავენ ნაჭროვან კირს მისი საერთო ხარჯის ერთი მესამედის ოდენობით და ამდენსავე რკინის მადანს. გაქრევის დასაწყისში საქმენი ახლოსაა აბაზანის ზედაპირთან, ჟანგბადის წნევა კი მაღალია. აბაზანა სწრაფად ხერდება და ხდება თხევადენადი წილის ჩამოყალიბება. ამის შემდეგ საქმენს აწვევენ, ხოლო ჟანგბადის წნევას შეამცირებენ და მისი შეხება ლითონთან პრაქტიკულად გამოირიცხება. ჟანგბადს შთანთქავს წიდა. გაქრევა გრძელდება წილის მოხდის მომენტამდე. თუ მუშაობა ტარდება წილის მოხდის გარეშე გაქრევა გრძელდება ბოლომდე. გაქრევის პერიოდში მცირე ულუფებით ამატებენ კონვერტერში კირს და რკინის მადანს. წილის მოხდის შემდეგ კონვერტერში შეაქვთ კირი, ცხელი სველისას – ჯართი და აგრძელებენ გაქრევას. რკინის დაქანგვისა და მისი დანაკარგების შესამცირებლად საქმენს უახლოებენ აბაზანის ზედაპირს.

ბუფერულ-წილურ პროცესში ჟანგბადის და ლითონის შესწავლილი კონტაქტის გამო გამოირიცხულია ლითონის გადახურება ლოკალურ ზონებში. ამ ხერხით მაღალფოსფორიანი თუჯიდან მიღებული ფოლადი ხარისხით არ ჩამოყვარდება მარტენისას.

გერმანიაში „რეინსაუსენის“, საფრანგეთში კი „პომპეს“ ქარხნებში გამოიყენეს სათომასე თუჯების გადამუშავების განსხვავებული ხერხი ჟანგბადის შებერვით ზემოდან. კონვერტერში ტოვებენ საბოლოო წიდას, რომლის შედგენილობაა 10 % P_2O_5 ; 30 % FeO და 50 % CaO . დნობას ატარებენ 40–50 მმ ზომის ნაჭროვანი კირის გამოყენებით.

გაქრევის დაწყების წინ წიდაში ამატებენ კირის საერთო ხარჯის 20–25 %-ს. დანარჩენ კირს ამატებენ გაქრევის პროცესში. თუჯის ნახშია ხდება 4–4,5 წუთის განმავლობაში მცირე ჰაელით. როდესაც ნახშირბადი ლითონში დაიწვეს 0,8–1,0 %-მდე, მოხდინ

შუალედურ წიდას, რომელიც შეიცავს 20–25 % P_2O_5 -სა და 10 %-ზე ნაკლებ FeO -ს. ამ დროს 1550–1600 °C ტემპერატურის მქონე ლითონშია 0,2 % P. წიდის მოხდის შემდეგ კონვერტერში ტვირთავენ ჯართს და განახლებენ გაქრევას. გაქრევის პირველი პერიოდი მისი საერთო ხანგრძლივობის 70 %-ს შეადგენს, ხოლო მეორეა 30 %. კირსა და რკინის მადანს გაქრევის შეუწყვეტლად ამატებენ კონვერტერში ღარის საშუალებით. გაქრევის პირველ პერიოდში ნახშირბადის ინტენსიური ამოწვის დაწყებასთან ერთად კონვერტერში ამატებენ რკინის მადანს. 2–3 წუთის შემდეგ კი შეაქვთ კირის პირველი ულუფა (20–25 %). დანარჩენ კირს ამატებენ გაქრევის მეორე პერიოდში, მებერვის განახლებასთან ერთად.

1,5–2,0 % P-ის შემცველი თუჯის აღწერილი ხერხით გადამუშავებისას მიღებულ ფოლადშია 0,02–0,03% P და 0,04–0,06 % C. 98 % სისუფთავის ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებისას მზა ფოლადი შეიცავდა 0,003–0,006 % აზოტს, ხოლო 99,5 %-სას – 0,002–0,003 %-ს. ჟანგბადის ხარჯი იყო 50–60 მ³/ტ.

გაქრევის ამ ხერხით შეიძლება როგორც მდულარე, ისე – მკირე, საშუალო და მაღალნახშირბადიანი თუ მკირედლეუბირებული მშვიდი ფოლადების მიღება, რომლებიც ხარისხით არ ჩამოუვარდებიან მარტენისას.

3.2.9 მაღალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავება ზედა გაქრევით მომუშავე კონვერტერებში ფხენილოვანი კირის გამოყენებით

ზედა გაქრევით მომუშავე კონვერტერში მაღალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავების დროს პრობლემას წარმოადგენს ზედმეტი ბერვის პერიოდის თავიდან აცილება, ვინაიდან მხოლოდ ამ მომენტისთვის ხდება აქტიური, მაღალი დეფოსფორაციის უნარის მქონე წიდის ჩამოყალიბება. ზედმეტი ბერვის პერიოდის აუცილებლობა კი გამორიცხავს საშუალო ნახშირბადიანი დაბალფოსფორიანი ლითონის გამოდნობის შესაძლებლობას. ასეთი ფოლადების გამოდნობა მაღალფოსფორიანი თუჯებიდან შესაძლებელი იქნება იმ შემთხვევაში, თუ დნობის დასაწყისშივე შეექმნით მაღალფუქიან, რკინის ქვეყანგით მდიდარ აქტიურ წიდას. ასეთი პირობის შესრულების შესაძლებლობას იძლევა ჟანგბადის ჭავლით კირის ფხენილის მებერვა და საქშენის მდებარეობის რეგულირება. პროცესი ტარდება შუალედური წიდის მოხდით.

ჟანგბადის ჭავლით ფხვნილოვანი კირის შებერვის პროცესის სხვადასხვა ვარიანტი დამუშავდა ბელგიაში, ლუქსემბურგსა და საფრანგეთში (ო'შ), ოლპ და ლდ-ა(ვ)*. ჟანგბადის ჭავლით მიწოდებული კირის ფხვნილი მაღალტემპერატურულ სონაში სწრაფად შედის რეაქციაში რკინის ქვეჟანგთან. მკვეთრად იზრდება სარეაქციო სონის ზედაპირი და წარმოიქმნება ფოსფორის მაღალი შთანთქმის უნარის მქონე წიდა.

ლდ-ა(ვ პროცესით დილინგენში, დენენში და დიუდელანქში გადაამუშავებდნენ შემდეგი შედგენილობის თუჯს: 1,6-2,0 % P; 0,1-1,0 % Si; 0,3-1,1 % Mn; 0,10-0,12 % S.

ამ პროცესით ფოსფატის გაშინებისას კონვერტერში ტვირთავენ თუჯის მასის 10-15 % ჯართს. გაქრევის დასაწყისში ჟანგბადის საქშენი დაშორებულია ლითონის ზედაპირიდან 2 მეტრით. გაქრევის პირველი პერიოდის ბოლოსათვის ეს მანძილი მცირდება 1 მეტრამდე. კირის ხარჯი პირველ პერიოდში შეადგენს 65-90 კგ/ტ თუჯს, ჟანგბადისა - 40 მ³/ტ. გაქრევის პირველი პერიოდი გრძელდება 13-16 წუთს. ნახშირბადი დაიწვეს 0,7-1,0 %-მდე, ფოსფორი კი - 0,2 %-მდე. ლითონის ტემპერატურა იზრდება 1570-1650 °C-მდე. ამ დროისათვის კონვერტერში წარმოიქმნება თუჯის მასის 20 % წიდა. მის ნაწილს (75-90 %) მოხდიან. მოხდილი წიდას შედგენილობაა: 20 % P₂O₅; 50-55 % CaO; 8 %-მდე SiO₂; 4-9 % Fe. წიდას მოხდის შემდეგ კონვერტერში ნატვირთავენ 10-15 % ჯართს ან გაქრევის მეორე პერიოდში დროგამოშვებით ამატებენ რკინის მაღანსა და ჯართს და უბერავენ კირს. მეორად წიდაშია 13-15 % P₂O₅. წიდას ორჯერადი მოხდის შემთხვევაში ფოსფორისა და გოგირდის რაოდენობა ლითონში მცირდება 0,015-0,020 %-მდე.

წიდას რეჟიმს, მის თხევადუნადობასა და დაჟანგულობის ხარისხს არეგულირებენ ჟანგბადის საქშენის მდებარეობის ცვლით. საქშენის მაღლა აწვევსას წიდა მდიდრდება რკინის ქვეჟანგით. ეს ხელს უწყობს წიდას აქაფებას და დეფოსფორაციას. კირის საერთო ხარჯი დნობაზე შეადგენს 105-110 კგ/ტ ფოლადზე, ჟანგბადისა - 52-60 მ³/ტ, ეარგისი სოდეების გამოსავალია 88,5-89,5 %. კონვერტერის დოლომიტ-ფისიანი ამონაგვის მედეგობა იცვლება 200-250 დნობის ფარგლებში.

* ო'შ) - Oxygen, Chau, Pulverise (ფრანგ.) - ჟანგბადი, კირი, გაფრქვევა;

ოლპ) - Oxygen, Lance, Poudre (ფრანგ.) - ჟანგბადი, ქშინი, ფხვნილი;

ლდ-ა(ვ) - Linzer, Düsenverfahren, ARBED (გერმ.) - არბედის ფირმის ლინცის შებერვის პროცესი.

ლდ-აც ხერხით დილინგენში და დენენში აღნობენ ძალსუ
რბილ (0,06 % C). დაბალ ნახშირბადიან (0,16–0,20 % C) და მაღალ-
ნახშირბადიან (0,5–0,7 % C) ფოლადებს. შედარებით დაბალი სისუფ-
თაის (98,5% O₂) ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით დიუდელანჟში
აღნობდნენ ღრმად გამოსაჰიმ რბილ და ნახშირბადიან ფოლადებს,
რომლებიც შესაბამისად შეიცავდა შემდეგი რაოდენობების
მინარეებს: 0,017 % P; 0,016 % S; 0,001–0,003 % N და 0,026 % P;
0,014 % S; 0,003–0,005 % N.

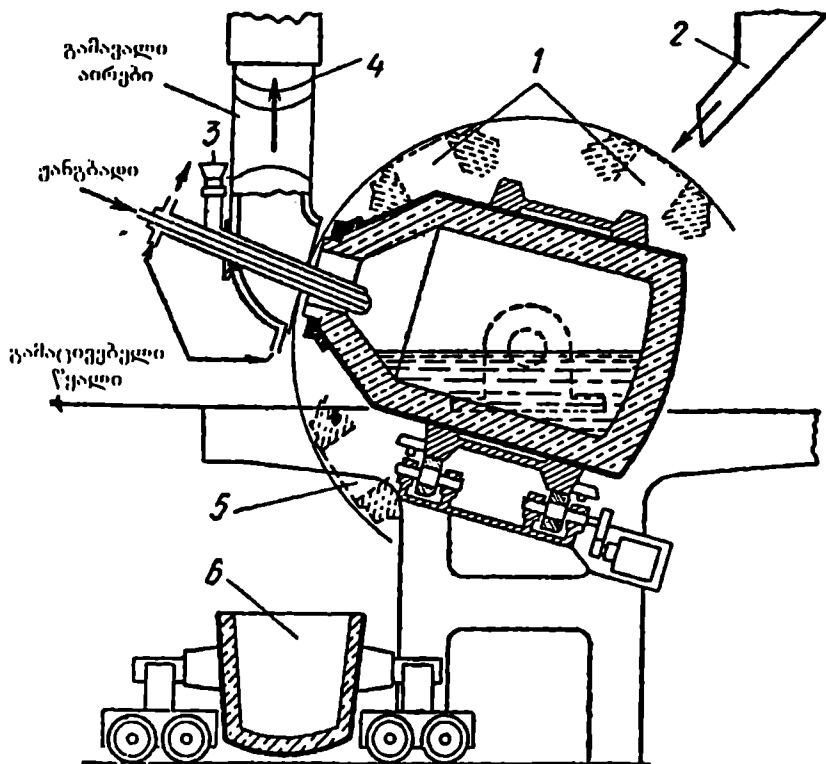
ლდ-აც ხერხი ფართოდ გამოიყენებოდა დასავლეთ ევროპის
მთელ რიგ ქვეყნებში – საფრანგეთში, გერმანიაში, ბელგიაში,
ლუქსემბურგსა და ინგლისში.

3.2.10. „კალდო–პროცესი“

მცირეაზოტიანი და მცირეფოსფორიანი ფოლადის მიღების
ახალ ხერხებს შორის, რომლებიც XX საუკუნის შუა წლებში
იქნა შექმნილებული, მეტალურგთა დიდი ყურადღება დაიმსახურა
„კალდო–პროცესმა“. ამ ხერხის ავტორია კალინგი. მან ეს მეთოდი
ნანერგა შვედეთის ქარხანაში "დომნარვეტი". თუჯში ჟანგბადის
შებურვის წინასწარი ცდები ნაატარეს დოლური ტიპის 3-ტონიან
ღუმელში.

1956 წ. დააყენეს 30-ტონიანი საწარმოო მბრუნავი ღუმელი
(სურ. 3.22). იგი ამოგებული იყო დოლომიტით. ახალი აგრეგატი
გვაგონებს ყრუსკერიან სიმეტრიულ კონვერტერს. მას შეუძლია
გრძისი ღერძის მიმართ ბრუნვა 30 ბრ/წთ სისქარით. კონვერტერი
დახრილია პორიზონტის მიმართ 15–20°-ით, ჟანგბადი შეჰყავთ
კონვერტერში წყლით საცივებელი საქშენის საშუალებით. საქშენი
დახრილია პორიზონტის მიმართ 18–25°-ით, ე.ი. კონვერტერის
ღერძის მიმართ დამატებითი დახრა აქვს 3–5°. კონვერტერის
ეკლთან მიდგმულია აირგამყვანი მილი (აირების გასაყვანად).

მბრუნავ კონვერტერში ხდებოდა მაღალფოსფორიანი თუჯის
გადამუშავება. „კალდო–პროცესის“ იდეას წარმოადგენს აბაზანის
არევის გაუმჯობესება როგორც ჟანგბადის ჭავლის კინეტიკური
ენერჯის ხარჯზე, ისე კონვერტერის ბრუნვის შედეგად და ამით
აქტიური წილის წარმოქმნის პროცესის დაჩქარება. ლითონის
მიერ ამონაგის თანაბარი წამორეცხვა კონვერტერის ბრუნვის
შედეგად გამორიცხავს ამონაგის ადგილობრივ გადახურებას და
ხრდის მის მედეგობას. გარდა ამისა, ლითონის სედაპირის მიმართ
ჟანგბადის დახრილად მიწოდებისას ფიქროდნენ ნახშირჟანგის



სურ. 322. კაღლო კონვერტერის სქემა

- 1 - მდგომარეობები ნატეირთეისას; 2 - კირისა და მადნის მიწოდება;
- 3 - ფხენილების მიწოდება; 4 - გადასაადგილებელი აირგამყვანი;
- 5 - კონვერტერის მდგომარეობა ფოლადის გამოშეებისას;
- 6 - ფოლადსახმეული ციციხე

ნახშირბადს უფრო სრულად დაწვას კონვერტერის სამუშაო სიერცეში. „კაღლო-პროცესით“ მუშაობის პრაქტიკამ ბევრ საკითხში დაამტკიცა გამოთქმული მოსაზრებანი.

მბრუნავ კონვერტერში მაღალფოსფორიანი (1,8–2,0 % P) 0,2–0,3 % Si-ის შემცველი თუჯების გადაამუშავებისას აბაზანის არევისა და აქტიური კირიანი წილის წარმოქმნის შედეგად ფოსფორის დაჟანგვა უფრო სწრაფად მიმდინარეობდა, ვიდრე ნახშირბადის ამოწვა.

ერთ-ერთი დნობის განხილვა გვიჩვენებს, რომ პირველი პერიოდი პრაქტიკულად არ გეჭონდა. ნახშირბადისა და ფოსფორის მოშორება ერთდროულად ისე მოხდა, რომ როდესაც ფოსფორის

ამოწვა დამთავრდა და მისი რაოდენობა ლითონში გახდა 0,025 %, მაშინ ნახშირბადი ლითონში ჯერ კიდევ მაღალი იყო (0,5 %).

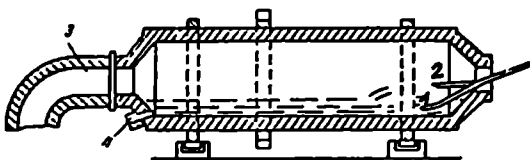
„კალდო-პროცესში“ წარმატებით ხორციელდება გოგირდის მოშორება. როდესაც თუჯში იყო 0,06 % გოგირდი, მზა ფოლადში დარჩა მხოლოდ 0,012–0,015 %. დეფოსფორაციის და დესულფურაციის მაღალ ხარისხს ხელს უწყობს წიღის ორჯერადი მოხდა, რაც გათვალისწინებულია ამ ხერხით მუშაობის დროს. პირველად წიდას მოხდიან ფოსფორის ძირითადი ნაწილის ამოწვის შემდეგ. ამიტომ წიდა დიდი რაოდენობით შეიცავს ფოსფორის ანჰიდრიდს და მცირე რაოდენობით (4 %) რკინას, რადგანაც რკინის ჟანგულეები სწრაფად იხარჯება ფოსფორისა და ნახშირბადის დაჟანგვაზე. კირის ხარჯი სათომაზე თუჯის გადამუშავებისას მისი წონის 13–14 %-ს შეადგენს. კონვერტერში ნახშირჟანგის დაწვის შედეგად მიიღება ჭარბი სითბო, რაც საშუალებას გვაძლევს გაცივებისათვის გამოვიყენოთ 14 %-მდე მაღანი და 40 %-ზე მეტი ჯართი. სითბოს ამ სიჭარბის წყალობით საშუალება გვაქვს გადავიმუშაოთ თუჯები ფოსფორის ნაკლები შემცველობით, მათ შორის – სამარტენეც. თხევადი ფოლადის გამოსავალი იყო 92 %, ჟანგბადის საშუალო ხარჯი – 64 მ³/ტ ფოლადზე.

ღნობის ხანგრძლივობა 30-ტონიან კონვერტერში ფოსფორიანი თუჯის გადამუშავებისას, წიღის ორჯერადი მოხდით შეადგენდა 35–40 წუთს. დოლომიტიანი ამონაგის მედეგობა შეადგენდა 50 ღნობას. ფიქრობენ, რომ მაგნეზიტიის აგურის გამოყენებით გაიზრდებოდა ამონაგის მედეგობა. „კალდო-პროცესით“ გამოდნობილი მკირენახშირბადიანი ფოლადის შედგენილობაა 0,02–0,05 % C; 0,05–0,11 % Mn; 0,016–0,033 % P; 0,012–0,020 % S და 0,002–0,003 % N, ე.ი. ფოლადი შეიცავს მცირე რაოდენობით ფოსფორს, გოგირდსა და აზოტს. ჟანგბადის სისუფთავე იყო 97 %. ზემომოყვანილი რაოდენობის აზოტის შემცველი ფოლადის მიღება ასეთი ჟანგბადის გამოყენებით გეინვენებს, რომ „კალდო-პროცესი“ ნაკლებ მგრძობიარეა ჟანგბადის სისუფთავის მიმართ, ვიდრე „ლდ-პროცესი“.

32.11. როტორული პროცესი

როტორული პროცესით ფოლადის მიღება შემუშავებულია ობერპაუსენში (გფრ). როტორული ღუმელი გარეგნულად ჰგავს დოლურს (სურ. 3.23), ბრუნავს 0,1–0,5 ბრ/წთ სინქარით. 60 ტონიანი როტორის გარე დიამეტრია 3,7 მ, შიგა – 2,7 მ, სიგრძე კი – 14,6 მ.

ღუმელის ამონაგი მაგ-
ნეზიტის აგურისაა,
ღანატკეპნი ფენა კი -
ფისიანი დოლომიტის.



სურ. 3.23. როტორული ღუმელი

1 - პირველადი ჟანგბადი; 2 - მეორადი ჟანგბადი;
3 - აირგამყვანი; 4 - გამოსაშვები ხერული

როტორის წინა
ტორსულ კედელში მო-
წყობილია 0,6 მ დია-
მეტრის სარკმელი, სა-
იღანაც მისადგმელი

ღარით წაასხამენ თუჯს, საქშენებით შეკრავთ ჟანგბადი, შეაქვთ
კირი და დამკანგველები. აირები გადის უკანა ტორსულ კედელში
მოწყობილი 0,8 მ დიამეტრის მქონე (ვენტრალური სარკმლიდან.
ამავე კედელშია წიდისა და ლითონის გამოსაშვები ხერული.
ჟანგბადის შებერვა ხდება ორი ჭავლით.

60 კვა (0,6 ატ) ჭარბი წნევის მქონე ჟანგბადის „პირველადი“
ჭავლი აბაზანაში ისე შეკრავთ სპილენძის ბუნიკიანი წყლით
საცეცხელი საქშენით, რომ ლითონში ჟანგბადის შეღწევის სიღრმე
იყოს 400 მმ. 300 კვა (3 ატ) ჭარბი წნევის მქონე ჟანგბადის
„მეორადი“ ჭავლი შეკრავთ მეორე საქშენით, რომელიც აბაზანის
ზემოთაა განლაგებული პირველის პარალელურად. მისი დანიშ-
ნულებაა აბაზანიდან გამოყოფილი ნახშირჟანგის დაწვა ნახში-
რორჟანგამდე. ფარდობა ჟანგბადის პირველად და მეორად რაოდე-
ნობებს შორის იცვლება. მოცემული ღუმელისათვის ოპტიმალური
ფარდობაა 1:4.

მთელი დნობა როტორულ ღუმელში შედგება შემდეგი ოპერა-
ციებისაგან:

მადანის და კირის ჩატვირთვა	15 წუთი;
თუჯის ჩასხმა	10-15 წუთი;
თუჯის შებერვა	50-60 წუთი;
წიდის მოხდა და ლითონის გამოშვება	20-25 წუთი.

ამრიგად, 60 ტ როტორში დნობა გრძელდება დაახლოებით
2 საათს. 1 % ნახშირბადის შემცველი სამარტენე ნახევარპრო-
დუქტის მისაღებად შებერვა გრძელდება 40 წუთს.

პრაქტიკამ გეჩვენა, რომ როტორში შეიძლება გადავამუშაოთ
ყველანაირი შედგენლობის თუჯი ფოსფორის ნებისმიერი შემცვე-
ლობით, რადგან მისი მოშორება ხდება ძალზე სწრაფად და
ეფექტურად. მიწარეების დაჟანგვის რიგი იგივეა, რაც „ლდ-პრო-
კესში“. შეიმჩნევა მხოლოდ ფოსფორის ამოწევის მეტი სინქარე-
ლითონში ნახშირბადის 2 %-მდე შემცირებისას ფოსფორის
კონცენტრაცია ლითონში მცირდება 0,1-0,2 %-მდე. ფოსფორის

მოშორების დიდი სისწრაფე აიხსნება იმით, რომ დნობით პირველსავე წუთებში წარმოიქმნება რეაქციის მაღალი უნარის მქონე რკინა-კირიანი წილა. ამის მიზეზია როტორის აბაზანის ზედაპირზე ნახშირჟანგის დაწვა ნახშირორჟანგამდე, რაც იძლევა 2000 °C ტემპერატურის მქონე აღს. ამის გამო ღუმელში სატვირთული კირი და მაღალი სწრაფად დნება.

ინტენსიური დუღილის შედეგად, წილის საფარისაგან ლითონის ზედაპირის ხშირი გაშიშვლების გამო, მეორადი ჟანგბადის ნაწილი იხარჯება მინარევების უშუალო დაჟანგვაზე. ნაწილობრივ ამით აიხსნება საწყის წილაში რკინის ქვეჟანგის დიდი რაოდენობა, რომელიც აღწევს 35-37 %-ს.

სათომასე თუჯის გადამუშავებისას მოხანშეწონილი აღმოჩნდა ორი წილით მუშაობა. ამ დროს პირველ წილას ხდიან მაშინ, როდესაც ფოსფორის კონცენტრაცია ლითონში მიაღწევს 0,1-0,2 %-ს, ე. ი. დეფოსფორაციის ბოლოს. მიღებული წილა შეიცავს 18-20 % P_2O_5 -ს და გამოიყენება სასუქად, როგორც თომასის წილა. წილის მოხდის მომენტისათვის რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა მასში მკირდება 10-15 %-მდე.

დნობის დამთავრებამდე როტორულ ღუმელში მყოფი მეორე წილის შესაქმნელად გამოიყენება რკინის მაღალი და კირი. ლითონის გამოშვებისას მეორადი წილის ნაწილს ღუმელში ტოვებენ შემდეგი დნობისათვის, რათა დაამქარონ პირველადი წილის წარმოქმნა.

როტორული დნობისას წარმატებით ხორციელდება დესულფურაციაც, რასაც ხელს უწყობს წილის მაღალი ტემპერატურა, მისი მოხდა და ლითონის უშუალო კონტაქტი დამჟანგველ ატმოსფეროსთან. ამ პროცესში შორდება თუჯში მყოფი გოგირდის 65-70 %. აქედან 15 % შორდება გოგირდის დაჟანგვის შედეგად SO_2 -ის წარმოქმნით.

1 ტ სათომასე თუჯზე ჟანგბადის ხარჯია 70 მ³. როტორული პროცესისათვის დამახასიათებელია მტერის ნაკლები რაოდენობით წარმოქმნა. წარმოქმნილი მტვერი მსხვილი ფრაქციისაა და ადვილად შორდება მარტივი აირსაწმენდებით. მშვიდი მარკის როტორული ფოლადი შეიცავს 0,004 % აზოტს. როტორული ლითონი ნაკლებ მგრძობიარეა აირად ატმოსფეროში ჟანგბადის რაოდენობის მიმართ. როგორც ფიქრობენ, ამის მიზეზს ის გარემოება წარმოადგენს, რომ მბრუნავ ღუმელებში არა გვაქვს ლითონის და ჟანგბადის შეხვედრის ადგილას მუდმივი მაღალი (2500 °C) ტემპერატურის ზონა. გარდა ამისა, როტორის კარგი ძერბეტიზაცია ამცირებს ჰაერის შეწოვას. ღუმელის ბრუნვას და

ამონაგის ადგილობრივი გადახურების გამორიცხვას უნდა გამო-
ეწვია ამონაგის მედეგობის გაზრდა. მოყვანილი დოლომიტის
ხარჯი (1 ტონა ფოლადზე 50 კგ) კი პირიქით გეინვენებს. სპილენძის
ბუნეიკიანი წყლით საცივებელი საქშენების მედეგობა 300 დნობაა.

3.2.12 ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი ქვემოდან შებერვით

ქვემოდან გაქრევით მომუშავე კონვერტერში აბაზანის არევის
პირობები ბევრად უკეთესია, ვიდრე ზემოდან ქშინით შებერვისას,
მაგრამ, როგორც უკვე ზემოთ აღვნიშნეთ, კუზნეცკის მეტალურ-
გიულ კომბინატში სუფთა ჟანგბადის ქვემოდან შებერვა ქშინის
ზონაში ძალზე მაღალი ტემპერატურის (2500 °C) გამო იწვევდა
კონვერტერის ფსკერის სწრაფად ცვეთას. ამიტომ, სხვადასხვა
ქვეყნებში ჩატარებული კვლევების შედეგად დამუშავდა ქვემოდან
ჟანგბადის შებერვა რგოლურად შემოკრული ნახშირწყლების ან
ინერტული აირის დამცველი ჭავლით. ეს ღონისძიება თავიდან
გეაცილებს ქშინის ზონაში ჟანგბადის უშუალო კონტაქტს თუჯ-
თან.

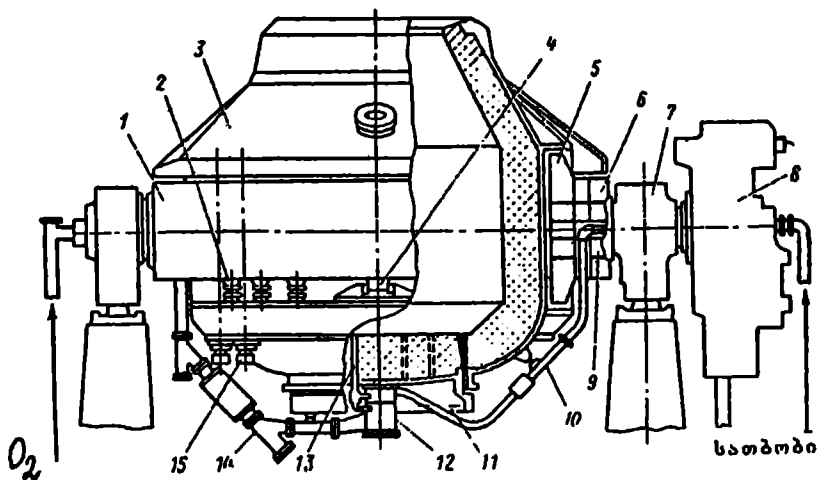
ჟანგბადის შერევა თუჯთან და თუჯის მინარევების ამოწვის
ეგზოთერმული რეაქციების შედეგად სითბოს გამოყოფა ხდება
ქშინიდან დაშორებით – ლითონის მოცულობაში. ამასთან ერთად
ლითონთან შეხებისას ნახშირწყლები იშლება, რაზეც იხარჯება
სითბო და ქშინის მახლობელ ზონაში ტემპერატურა დაბლა იწვევს.
ყოველივე ამის შედეგად კონვერტერის ფსკერის მედეგობა იზრ-
დება რამდენიმე ასეულ დნობამდე.

ჟანგბადის შებერვა ნახშირჟანგის დამცველი რგოლური
ჭავლით პირველად განხორციელდა 1957 წ. ნოვო-ტულის მეტა-
ლურგიული ქარხნის 10-ტონიან კონვერტერში.

სამრეწველო მასშტაბით დამცველი ჭავლით ჟანგბადის
შებერვა დაინერგა გფრ-ში 1967–1968 წლებში. ამჟამად უცხოეთის
ქვეყნებში გამოიყენება ამ ხერხის სხვადასხვა მოდიფიკაცია.

გფრ-ის ობმ და აშშ-ს ქუ-ბოპ პროცესებში დამცველი აირის
სახით გამოიყენება აირადი ნახშირწყლების რგოლური განიფ-
კეთის ჭავლი. ფრანგულ ლეც და ყოფილი გდრ-ის კეკ პროცე-
სებში დამცველი პერანგის სახით გამოყენებული იყო თხევადი
სათბობი. ყოფილ საბჭოთა კავშირში ქვემოდან ჟანგბადის შებერვა
აითვისეს ძერჟინსკის მეტალურგიული კომბინატის 250 ტ ტევა-
ლობის კონვერტერში.

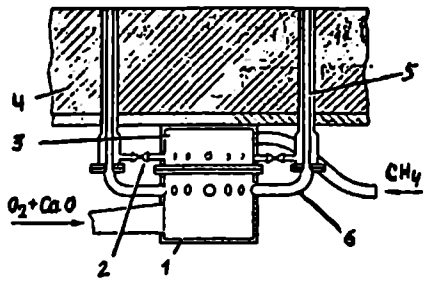
ჟანგბადის ქვემოდან შებერვით მომუშავე კონვერტერი განსხვავდება ზემოდან შებერვით მომუშავესაგან. კონვერტერს აქვს მისადგმელი ფსკერი და მასთან მიღებით ჟანგბადის მიმყვანი სისტემა. ჟანგბადის მიღები პოტოტიკში გაჩარხული არხებით უერთდება კონვერტერის ფსკერში დატანებულ ქშინებს. ერთი პოტოტიკიდან შედის ჟანგბადი (ზოგჯერ ფხენილოვან კირთან ერთად), მეორედან კი - დამცველი აირი ან თხევადი სათბობი. გაქრვის დამთავრების შემდეგ ორივე მილსადენით მიაწოდებენ ნეიტრალურ აირს. მაგალითად, სურათზე 3.24 ჩანს, რომ ერთი მილსადენით (10) მიეწოდება ბუნებრივი აირი, ხოლო მეორით (14) ხდება ჟანგბადისა და კირის ფხენილის შებერვა. აირები შედის ფსკერზე დამაგრებული ცენტრიდანული გამყოფიდან (12), იქიდან კი - თითოეულ ქშინთან. ფხვიერი კირი იწვევს შესაბამისი მილსადენის (14) გაძლიერებულ აბრაზიულ ცვეთას, ამიტომ იგი სქელკედლიანია და მზადდება ცალკეული სექციებისაგან გაცივ-თილი ნაწილის სწრაფი შეცვლის მიზნით. აბრაზიული ცვეთის შესამცირებლად მიღებს შიგნიდან ფარავერ კერამიკის სხიული ფენით (ჩანასხამით).



სურ. 3.24. ქვემოდან შებერვით მომუშავე 250-ტონიანი კონვერტერის კონსტრუქცია

1 - საყრდენი რგოლი; 2 - დემოფერი; 3 - დამცველი გარსაცმი; 4 - საბჯენი; 5 - პოტოტიკური საბჯენი; 6 - პოტოტიკური ფილა; 7 - საყრდენი საკისარი; 8 - შემოსაბრუნებელი კიდული ამბრავეი; 9 - პოტოტიკი; 10, 14 - აირმიმყვანი მილსადენები; 11 - მოსახსნელი ფსკერი; 12 - ცენტრიდანული გამყოფი; 13 - ქშინი; 15 - კორპუსის საკიდრის საწვეი.

ცენტრიდანული გამყოფის ძირითადი დანიშნულებაა ჟანგბადისა და კირის თანაბარი განაწილება ქვინებს შორის. ცენტრიდანული გამყოფი შედგება ორი ცილინდრული კამერისაგან (სურ. 3.25). ერთ მათგანში მხებად შედის ჟანგბადის და კირის ნარევი, მეორეში ბუნებრივი აირი. ამ კამერებიდან აირები ცალ-ცალკე მილსადენებით ნაწილდება ფსკერის ქვინებით. ბუნებრივი აირის მისაწოდებელ მილტუნაზე მოწყობილია ხარჯვის რეგულატორი ცალკეულ ქვინზე ხარჯის რეგულირებისათვის. ბუნებრივი აირის მიწოდება შეიძლება ცენტრიდანული გამყოფის გარეშეც რგოლური კოლექტორიდან.

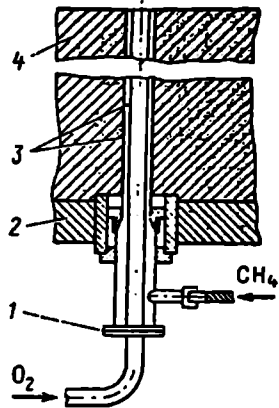


სურ. 3.25. ცენტრიდანული გამყოფის მოწყობილობა ჟანგბადის კირთან ერთად და ბუნებრივი აირის მოსაწოდებლად

1 - ჟანგბადის გამყოფი; 2 - ბუნებრივი აირის ხარჯვის რეგულატორი; 3 - ბუნებრივი აირის გამყოფი; 4 - ფსკერის ამონაგი; 5 - ფსკერის ქვინი; 6 - ქვინში ჟანგბადის მისაწოდებელი მილტუნა.

კირის გამოყენების გარეშე მუშაობისას ჟანგბადის და ბუნებრივი აირის ქვინებში გასანაწილებლად გამოიყენება კონვერტერის ფსკერზე დამაგრებული დიდი დიამეტრის რგოლური მილები (მილიოვანი კოლექტორები).

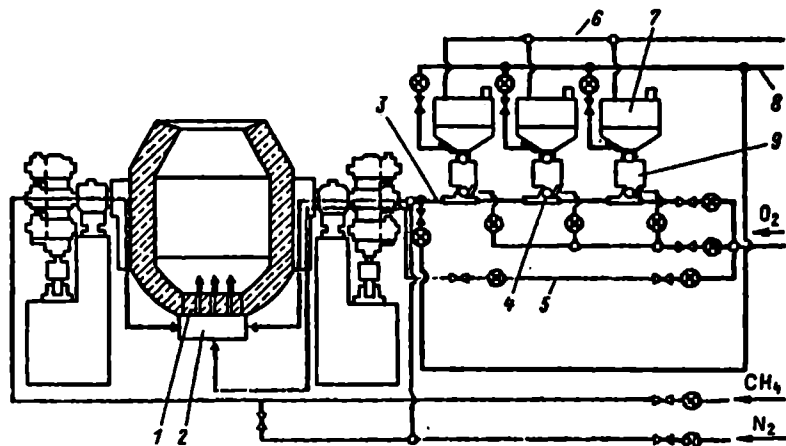
ფსკერული ქვინი (სურ. 3.26) წარმოადგენს ერთმანეთში კონცენტრულად განლაგებულ 2-3 მმ კედლების სისქის მქონე ორ მილს. შიგა მილი მზადდება კოროზიამდეგი ფოლადისაგან. 28-50 მმ-იანი დიამეტრის ცენტრალური მილით მიეწოდება ჟანგბადი. შიგა და გარე მილებს შორის არსებული რგოლური ღრეჩოთი, რომლის სისქეა 0,6-2 მმ, მიეწოდება ბუნებრივი აირი, პროპანი ან თხევადი სათბობი. ბუნებრივი აირის ხარჯია ჟანგბადის ხარჯის 6-10 %, ხოლო პროპანისა - 3,5 %. თხევადი სათბობის ხარჯია 2-3 ლ/ტ ფოლადზე. გაქრევის პერიოდებს შორის პაუზის



სურ. 3.26 ქვინი ჟანგბადის ფსკერიდან შესაბურად

1 - მილტუნა შეერთება; 2 - ფსკერის კორპუსი; 3 - ფოლადის მილები; 4 - ამონაგი

დროს. ქვინების გაცივებისა და დაჭუჭყიანების თავიდან აცილების მიზნით, ატარებენ აზოტით გაქრევას. ფსკერის მედეგობა კონვერტერის კედლებისას უფრო ნაკლებია. ამიტომ კამპანიის განმავლობაში მას ცვლიან ერთხელ ან ორჯერ. თითოეულ შეცვლაზე იხარჯება 12-20 საათი.



სურ. 3.27 ქვედა შებერვით მომუშავე კონვერტერში კირის ფხენილის მიწოდების სქემა

1 - ფსკერი; 2 - ცენტრიდანული გამყოფი; 3 - ფსკერში $O_2 + CaO$ მიწოდება; 4 - დოზატორი; 5 - ფსკერში სუფთა ჟანგბადის მიწოდება; 6 - ხარჯის ხეიმირებში კირის მისაწოდებელი პნევმოტრასა; 7 - კირის ხარჯის ხეიმირა; 8 - შეკუმშული ჰაერის მისაწოდებელი ტრასა; 9 - ტენზოგადამწოდებზე დადგმული პნევმოტუმბო

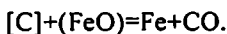
კირის მიწოდებით მომუშავე კონვერტერების სქემა მოყვანილია სურათზე 3.27. კირის ფხენილი პნევმოტრასით (6) მიეწოდება ხეიმირაში (7), რომელშიც აგრეთვე შეჭყავთ შეკუმშული ჰაერი კირის ჩატკეპნის თავიდან ასაცილებლად. ხეიმირიდან კირი მიეწოდება ტენზოგადამწოდებზე დადგმულ პნევმოტუმბოს (9), სადაც ის აიწონება. აქედან ჟანგბად-კირის ნარევი მიწოდების სიჩქარის დოზატორით (4) შედის ჟანგბადსადენში (3), იქიდან ღრუ პოტოციკის საშუალებით გადადის ცენტრიდანულ გამყოფსა (2) და ფსკერის (1) ქვინებში.

3.2.13 ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ტექნოლოგია ნაჭროვანი კირის გამოყენებით

ჩვეულებრივი დაბალფოსფორიანი (<0,3 % P) თუჯების ქვემოდან შებერვის ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ორი სახეობაა ცნობილი: 1) დნობა ნაჭროვანი კირის გამოყენებით და, 2) დნობა ფხვნილოვანი კირის გამოყენებით.

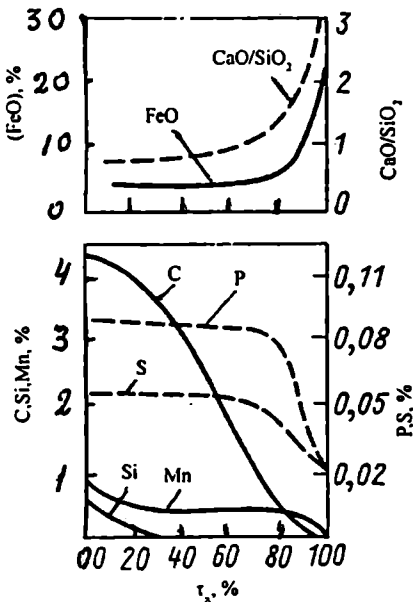
კონვერტერში ნაჭროვანი კირის გამოყენებით დნობისას, თავდაპირველად ჩატვირთავენ ფოლადის ჯართს, შემდეგ კი ჩაასხამენ თხევად თუჯს. კონვერტერის ვერტიკალურ მდგომარეობაში გადაყვანასთან ერთად იწყებენ გაქრევას და ტვირთავენ კირის ნაჭრებს მდნობ შპატთან ერთად.

გაქრევის პერიოდში იგივე პროცესები მიმდინარეობს, რაც ჟანგბადით ზემოდან გაქრევისას, მაგრამ იმ განსხვავებით, რომ ქვემოდან შებერვისას ძალზე ინტენსიურად ხდება ლითონისა და წილის არევა, რის შედეგადაც ძლიერდება წიდაში მყოფი რკინის ქვეჟანგით ლითონიდან ნახშირბადის ამოწვის რეაქცია.



ეს ძლიერ ამცირებს წიდაში რკინის ქვეჟანგის კონცენტრაციას, რომელიც არ აღემატება 5-6 %-ს. ამ რეაქციის დამთავრების მერე, როცა ნახშირბადის კონცენტრაცია 0,1 %-ზე ნაკლებია, იწყება რკინის დაჟანგვა, რის გამოც იზრდება წიდაში რკინის ქვეჟანგის წილი (სურ. 3.28).

წიდაში რკინის ქვეჟანგის დაბალი კონცენტრაცია უარყოფით გავლენას ახდენს ლითონის დეფოსფორაციაზე. ფოსფორის მოშორებისთვის საჭიროა მაღალფუძიანი წიდა. მაგრამ კირის გახსნას წიდაში აფერხებს



სურ. 3.28 წილისა და ლითონის შედგენილობის ცვლილება კონვერტერში ჟანგბადით ქვემოდან გაქრევის პროცესში ნაჭროვანი კირის გამოყენებისას

რკინის ქვეჟანგის დაბალი კონცენტრაცია. წიდაში კირის გახსნისა და მისი ფუძიანობის ამაღლებისათვის საჭიროა დამჟანგავი – რკინის ქვეჟანგით მდიდარი წიდა. ამიტომ, დეფოსფორაცია იწყება მაშინ, როდესაც ნახშირბადის კონცენტრაცია გახდება 0.1 %-ზე ნაკლები და წიდაში გაიზრდება რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა. ფოსფორი და გოგირდი გაქრევის მთელი ხნის მანძილზე უცვლელია და მხოლოდ დნობის ბოლოს მაღალფუძიანი წილის ჩამოყალიბების შემდეგ იწყება მათი მოშორება (სურ. 3.28). ამდენად, ნატროვანი კირით მუშაობისას ფოსფორისა და გოგირდის საჭირო რაოდენობამდე დაყვანისათვის აუცილებელია გაქრევის ჩატარება ნახშირბადის ძალზე დაბალ კონცენტრაციებამდე, თუმცა იმავდროულად იზრდება რკინის დანაკარგები დაჟანგვისა და წიდაში გადასვლის გამო.

დნობის გარკვეულ პერიოდამდე წიდაში რკინის ქვეჟანგის სიმცირის გამო მანგანუმის დაჟანგვის რეაქცია შეზღუდულად მიმდინარეობს (სურ. 3.28), დნობის ბოლოს კი – ინტენსიურად. გაქრევის პროცესი მთავრდება მას შემდეგ, როცა მიაღწევენ ლითონში ფოსფორის და გოგირდის დაბალ შემცველობებს.

გაქრევის ბოლოს ნახშირწყლების დაშლის შედეგად გამოყოფილი წყალბადის რაოდენობა აღწევს 6–10 სმ³/100გ ლითონზე. მის მოსაშორებლად ჟანგბადის გაქრევის დამთავრების შემდეგ კონვერტერში 20–60 წამის განმავლობაში უბერავენ არგონსა ან აზოტს. ამ ღონისძიების შედეგად წყალბადის რაოდენობა მცირდება და ხდება 2–4 სმ³/100გ ლითონზე.

ლითონის განჟანგვასა და დანახშირბადიანებას ახდენენ ნადნობის გამოშვებისას ციცხეში.

3.2.14. ქვემოდან უბერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ტექნოლოგია ფხვნილოვანი კირის გამოყენებით

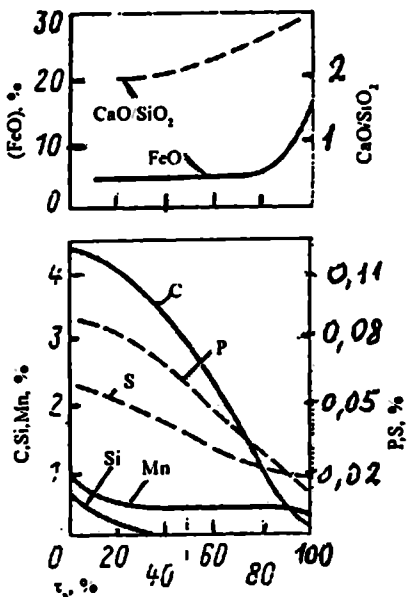
კონვერტერში ჯართის ჩატვირთვისა და თუჯის ჩასხმის შემდეგ იწყებენ ჟანგბადით გაქრევას. მისი ხანგრძლივობის პირველ 1/2–2/3 დროს უბერავენ კირის ფხვნილს, ზოგჯერ მცირეოდენი მლღობი შპატის დამატებით. კირის ფხვნილის ზომა 0,15 მმ და ნაკლებია. მისი ხარჯია 40–70 კგ/ტ.

ნატროვანი კირის გამოყენების მსგავსად რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა წიდაში თავიდან არ აღემატება 5–6 %-ს, თუმცა დეფოსფორაციისა და დესულფურაციის პროცესები განსხვავ-

ვებულია (სურ. 329). დაფხენილი კირის გამოყენებისა და ინტენსიური არევის წყალობით მაღალფუჟიანი წიდა ყალიბდება გაქრევის დასაწყისში, რაც ხელს უწყობს ფოსფორისა და გოგირდის მოშორების პროცესს. ლითონი მანვე მინარევეების დაბალი კონცენტრაციით მიიღება ნახშირბადის საკმაოდ მაღალი შემცველობისას, რის გამოც ამ ხერხით შესაძლებელი ხდება საშუალო და მაღალნახშირბადიანი ფოლადების გამოღობა.

ჟანგბადის გაქრევას უწყვეტენ ნახშირბადის საჭირო კონცენტრაციის მიღწევის შემდეგ. დნობას ამთავრებენ ინერტული აირების, არგონის ან აზოტის შებერვით. ამ აირების შებერვა 20–60 წამის განმავლობაში საგრძნობლად ამცირებს ლითონში გახსნილი წყალბადის რაოდენობას.

ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ორივე ვარიანტს ერთნაირი ტექნოლოგიური მაჩვენებლები აქვს: გაქრევის ინტენსიურობაა 3–6 მ³/ტ·წთ; გაქრევის ხანგრძლივობაა 8–13 წთ; ჟანგბადის კუთრი ხარჯია 45–55 მ³/ტ, ბუნებრივი აირის – 4–5 მ³/ტ, პროპანის – 1,5 მ³/ტ, თხევადი სათბობის – 2–3 ლ/ტ. ლითონის გაქრევასა და დნობებს შორის პაუზების დროს, აზოტის ხარჯი ქშინის გაცივებაზე უდრის 15–20 მ³/ტ.



სურ. 329. წიდასა და ლითონის შედგენილობის ცვლილება კონვერტერში ჟანგბადით ქვემოდან გაქრევის პროცესში დაფხენილი კირის გამოყენებისას

3.2.15 ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის დადებითი და ნაკლოვანი მხარეები

ჟანგბად-კონვერტერში ჟანგბადის ზემოდან შებერვის პროცესს ქვემოდან გაქრევის ხერხთან შედარებით ახასიათებს მთელი რიგი დადებითი და უარყოფითი მხარეები.

ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის დადებითი მხარეებია:

– აბაზანის მცირე აქაფება, რაც იწვევს ლითონისა და წილის ამოფრქვევების შემცირებას;

– წილის საგრძნობლად შემცირებული დაჟანგულობა. რომელიც იზრდება მხოლოდ ნახშირბადის დაბალი კონცენტრაციის მიღწევის შემდეგ;

– კონვერტერიდან გამომავალი აირებით დნობის მტერის გამოტანის შემცირება, რადგან მსხვილ ნაწილაკებს შთანთქავს ლითონი და წიდა;

– ვარგისი ფოლადის გამოსავლის გაზრდა 1–1,5 %-ით (მტერის გამოყოფის და ლითონის ამოფრქვევების შემცირების შედეგად);

– დნობის პროცესში ნაკლები მანგანუმის დაჟანგვა, რის შედეგადაც მცირდება მანგანუმის ფეროშენადნობების ხარჯი;

– დეფოსფორაციის და დესულფურაციის მაღალი ხარისხი, რასაც უზრუნველყოფს ფხენილოვანი კირის გამოყენება;

– დამჟანგველისა და ლითონის შეხების ზედაპირის საგრძნობი გაზრდა (აბაზანის ინტენსიური არევისა და ნახშირწყლების დაშლის მერე აირადი ღრმულების წარმოქმნის შედეგად). რაც უზრუნველყოფს ნახშირბადის დაყვანას 0,02 %-მდე (ჟანგბადის ზემოდან შებერვისას მისი შემცირება 0,06–0,05 % უფრო დაბლა არ არის მიზანშეწონილი, რადგანაც ძლიერდება რკინის დაჟანგვა და დიდი რაოდენობით იკარგება იგი წიდასთან ერთად).

– კონვერტერის ნაკლები სიმაღლე ზემოდან შებერვის ვარიანტთან შედარებით (იმის გამო, რომ აღარაა საჭირო ქმინის ვერტიკალური გადაადგილების სივრცე).

ჩამოთვლილ დადებით მხარეებთან შედარებით ჟანგბადის ქვედა შებერვით მომუშავე კონვერტერებს ნაკლოვანებებიც გააჩნია. ნახშირწყლების დაშლაზე იხარჯება სითბო, მცირდება სითბოს შემოსავალი რკინის მცირე რაოდენობით დაჟანგვის გამო, რაც, თავის მხრივ, ამცირებს ნახშირბადის დაჟანგვას ნახშირორჟანგამდე და ამ გზით სითბოს შემოსევას. ზედა შებერვით მომუშავე კონვერტერიდან ამომავალ აირებში ნახშირორჟანგის რაოდენობაა 10 %, ქვევიდან გაქრვისას კი – 5 % ან ნაკლები. ნაჭროვანი კირის გამოყენების ნაკლია აქტიური წილის გვიან ჩამოყალიბება. მართალია, ეს ნაკლი შეიძლება გამოვასწოროთ ფხენილოვანი კირის გამოყენებით, მაგრამ ამ შემთხვევაში საჭიროა კირის დასაფქვევად და შესაბერად სპეციალური რთული მოწყობილობის გამოყენება.

წყალბადის მოსაცილებლად და დნობათა შორის პაუზების დროს ქმინის გასაცივებლად ინერტული აირების შებერვა არ-

თულებს ფსკერის კონსტრუქციას და მის ექსპლუატაციას. გარდა ამისა, რთულდება ჟანგბადის, დამცავი და ინერტული აირების მიწოდების სისტემა. ამასთან ერთად იზრდება მოცდენები ფსკერის შეცვლაზე. კონვერტერის დახრის დროს შებერვა იწვევს ლითონის წვეთების გამოფრქვევას და ამიტომ საჭირო ხდება წვეთებისა და კვამლის შემაკავებელი შემოღობვის მოწყობა. კონვერტერიდან გამოშავალი აირები, ნახშირბადის ნელა ამოწვისას, შეიცავს 20–30 % წყალბადს, რაც ზრდის აირგამყვანი ტრაქტის ფეთქებად-საშიშროებას, თუ არ არის გათვალისწინებული გამავალი აირების კმაწვა (სრული წვა).

3.2.16. ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი კომბინირებული გაქრევით

ფოლადის გამოდნობის დროს კომბინირებული გაქრევის გამოყენება ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის განვითარების შემდგომი ეტაპია. კაპიტალისტურ ქვეყნებში 1986 წლისათვის ამ ხერხით მუშაობდა 142 კონვერტერი, ქვემოდან შებერვით – 25. ხოლო ჟანგბად-კონვერტერების საერთო რაოდენობა კი 345 იყო.

კომბინირებული გაქრევით მომუშავე კონვერტერული პროცესების ფართო განვითარებას ხელი შეუწყო იმ გარემოებამ, რომ დნობის ერთ ტექნოლოგიურ ოპერაციაში გამოიყენებოდა როგორც ზემოდან გაქრევის, ასევე ქვემოდან გაქრევის პროცესების უპირატესობანი. ზედა გაქრევის დადებით მომენტად ითვლება ფუძე წილის ადრე ჩამოყალიბება, ხოლო ქვედასი კი – აბაზანის ინტენსიური არევა. ლითონისა და წილის ენერგიული არევის შედეგად მცირდება წილის დაჟანგულობა და აქაფება, უმჯობესდება დეფოსფორაციისა თუ დესულფურაციის პირობები, შესაძლებელი ხდება ჯართის გაზრდილი რაოდენობით მუშაობა.

კომბინირებული ბერვის მრავალი სახესხვაობაა დამუშავებული. მათთვის საერთოა ჟანგბადის მიწოდება ზემოდან წყლით საცივებელი ქმინით, განმასხვავებელი კი – ქვემოდან (ფსკერიდან) მიწოდებული აირების სახეობა და მიწოდების ხერხი. ამ თვალსაზრისით კომბინირებული გაქრევის შემდეგი სახეებია ცნობილი:

1) ფსკერში ჩადგმული ფორიანი ცეცხლგამძლე ბლოკებით ნეიტრალური აირების – არგონის და აზოტის, იშვიათად კი ნახშირორჟანგის მიწოდება (ლბე პროცესი).

2) ნეიტრალური აირების ქვემოდან გაქრევა ერთი საქშენით (მიღები, ხერელები ამონაგში, რგოლური ღრეჩოები). ამ ხერხის ძალზე ბევრი სახესხვაობაა ცნობილი (ლდ-კგ; ტბმ; ლდ-ცბ; ლდ-ოტბ; ნკ-კბ; ლდც; ნკ-ცბ; ლდ-კგც; ლდ-აბ პროცესები).

3) ნახშირწყლების რგოლური განიეკვეთის გარსით გარემო-ცული ჟანგბადის ან ზოგჯერ ნახშირორჟანგის ჭავლის შებერვა ფსკერული საქშენებით (ლდ-ობ; ლდ-ხ(ც); ლეტ პროცესები).

4) ინერტული აირების რგოლური განიეკვეთის გარსით გარემო-ცული ჟანგბადის ჭავლით გაქრევა (კტბ პროცესი).

5) ინერტული აირების რგოლური განიეკვეთის გარსით გარემო-ცული ქაერის ჭავლის შებერვა ფსკერული საქშენებით (ბაპ პროცესი).

6) ჟანგბადის გაქრევა ფხენილოვან კირთან ერთად რგოლური დამცველი გარსით ფსკერული საქშენებიდან (კ-ობმ და ქუ-ბოპ პროცესები).

კომბინირებული გაქრევის ჩამოთელილი ხერხები ერთმანეთისაგან განსხვავდება აგრეთვე ფსკერიდან აირების მიწოდების ინტენსიურობით. კ-ობმ, ქუ-ბოპ და ცტბ პროცესებში ფსკერიდან მიწოდებული ჟანგბადის ინტენსიურობა იცვლება 0,6–1,0 მ³/(ტ·წთ) ფარგლებში; ლდ-ობ, ლეტ და ლდ-ხ(ც პროცესებში – 0,3–0,6 მ³/(ტ·წთ); ნეიტრალური აირების ფსკერიდან მიწოდების შემთხვევაში ინტენსიურობაა 0,1–0,25 მ³/(ტ·წთ).

ჩამოთელილი ხერხებიდან ყველაზე მეტად გამოიყენება ლბე პროცესი: ჟანგბადის მიწოდება ზემოდან, ნეიტრალური აირებისა კი ფსკერიდან.

ყოფილ საბჭოთა კავშირში კომბინირებული გაქრევის ორი ხერხი გამოიყენებოდა: 1) ჟანგბადის შებერვა ზედა საქშენით, ქვემოდან კი – ბუნებრივი აირის დამცველი გარსით; 2) ჟანგბადის შებერვა ზემოდან, ქვემოდან კი ნეიტრალური აირებით გაქრევა.

3.2.17. ჟანგბადით გაქრევა ზემოდან და ქვემოდან

გაქრევის ეს ხერხი დამუშავდა და დაინერგა 250 ტ კონვერტერებში ყოფილ საბჭოთა კავშირში ძერჟინსკის სახ. მეტალურგიულ კომბინატში. ჟანგბადის ზემოდან გაქრევა ხდება წყლით საცივებული ქშინებით. ჟანგბადის ქვემოდან გაქრევა ხდება ჩასადგმელ ფსკერში დატანებული 6–10 ფსკერული ქშინით, რომლებთანაც საჭიროებისამებრ ხდება ჟანგბადის, ბუნებრივი აირისა და აზოტის მიწოდება სპეციალური სისტემით. ბუნებრივი აირი მიეწოდება

გაქრევის პერიოდებს შორის შუალედში, აზოტი კი — ჟანგბადის ტრაქტით. ზემოდან და ქვემოდან მიწოდებისას ჟანგბადის საერთო ხარჯია 750—1100 მ³/წთ. როდესაც ჟანგბადის ხარჯია 750 მ³/წთ, გაქრევის ხანგრძლივობაა 18—19 წთ. ქვემოდან შებერილი ჟანგბადის ხარჯი მისი საერთო ხარჯის 6—25 %-ის ფარგლებში იცვლებოდა. აქედან ოპტიმალურადაა მინჩეული 12—14 %, რაც უზრუნველყოფდა კა²ს²ში გადასამუშავებელი ჯართის მეტ წილს. დამკავი ბუნებრივი აირის ხარჯი იყო ქვემოდან მიწოდებული ჟანგბადის რაოდენობის 9—12 %. პროცესი მომდინარეობდა ფოლადში 0,05—0,08 % ნახშირბადის მიღწევამდე.

გაქრევის დასაწყისში ჟანგბადის ზედა ქშინი აბაზანის ზედაპირიდან იმყოფება 3 მ სიმაღლეზე. შემდეგ მას უახლოვდებიან აბაზანის ზედაპირს და ეს მანძილი მცირდება 1 მეტრამდე. კომბინირებული გაქრევის დროს არ შეიმჩნევა ლითონის ამოსროლები. ჟანგბადის ქშინის მაღალ მდგომარეობაში ყოფნა ხელს უწყობს აბაზანიდან გამოყოფილი ნახშირჟანგის დაწვას ნახშირორჟანგამდე. ამის შედეგად შექმნილი სითბოს დამატებითი წყარო საშუალებას გვაძლევს გავზარდოთ ჯართის წილი კა²ს²ში.

გარკვეული რეჟიმით ხდება წილის წარმოქმნის პროცესის რეგულირება. ამისთვის კირს მისი საერთო ხარჯის 20—30 %-ის ოდენობით ნატეირთავენ ჯართის 'ხედაპირ'ზე კონვერტერში თუჯის ნახსმამდე. კირის დანარჩენ რაოდენობას გარკვეული ულუფებით ამატებენ გაქრევის პირველ 4—6 წუთში. გაქრევის მეორე პერიოდში კონვერტერში ამატებენ მლღობ შპატს. რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა წიდაში არ აღემატება 5—7 %-ს და მხოლოდ გაქრევის საერთო ხანგრძლივობის 70 %-ის გავლის შემდეგ იზრდება. რკინის ქვეჟანგის რაოდენობის ზრდა აჩქარებს წიდაში კირის გახსნას და მისი ფუძიანობა ხდება 3-ზე მეტი. ამიტომ სწორედ გაქრევის საერთო დროის 70 %-ის გასვლის შემდეგ იწყება ლითონის დეფოსფორაცია. დესულფურაცია არ მიმდინარეობს, რადგანაც გოგირდი დიდი რაოდენობით შეაქვს კონვერტერში თუჯთან ერთად მოყოლილ მიქსურის წიდას.

ქვემოდან შებერილი აირების ხარჯი აღემატება 0,5 მ³(ტ-წთ). ეს უზრუნველყოფს აბაზანის ინტენსიურ არევას, წიდაში რკინის ქვეჟანგის წილის ზრდას, კირის გახსნას შებერვის საერთო დროის ორი მესამედის გასვლის შემდეგ და შესაბამისად, წიდაში ფოსფორის ინტენსიურ გადასვლას. ამის გამო ამ ხერხით შეუქმლებელია საშუალო და მაღალნახშირბადიანი ფოლადების გამოღობა.

ჟანგბადის კომბინირებული შებერვის ხერხის დადებით მხარეს წარმოადგენს ვარგისი ლითონის გამოსავლის ზრდა, წილის აქა-

ფებისა და ამოტყორცნების შემცირების შედეგად რკინის დანაკარგების შემცირება, ჯართის გაზრდილი რაოდენობით მუშაობა კონვერტერის სამუშაო სივრცეში ნახშირჟანგის დაწვის შედეგად გამოყოფილი დამატებითი სითბოს ხარჯზე და მანგანუმის დაჟანგვის შემცირება.

3.2.18 ჟანგბადის გაქრევა ზემოდან და ინერტული აირებისა – ქვემოდან

ჟანგბადის გაქრევა ზემოდან ხდება ჩვეულებრივი ან ორიარუსიანი ქვინებით, ხოლო ნეიტრალური აირების (Ar, N_2) მიწოდება კი – ქვემოდან 4–10 ქვინის საშუალებით. გამოცდილი იყო აგრეთვე ნეიტრალური აირების შებერვა მრავალარხიანი ცეცხლგამძლე ბლოკებით. დასავლეთ ციმბირის მეტალურგიული კომბინატის მუშაობის გამოცდილებიდან ცნობილია, რომ აბაზანის ინტენსიური არევა ხდება ერთარხიანი ქვინების გამოყენებისას.

დნობა ჩამდინარეობს ჟანგბადის ზემოდან შებერვის პროცესის ანალოგიურად, იმ განსხვავებით, რომ ზოგჯერ დნობის ბოლოს ჟანგბადის გაქრევის დამთავრების შემდეგ 3–6 წუთის განმავლობაში კონვერტერში უბერავენ არგონს.

დნობას წარმართავენ შემდეგი რეჟიმით:

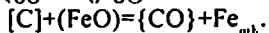
ჯართის ჩატვირთვის და თხევადი თუჯის ჩასხმისას კონვერტერში უბერავენ აზოტს $0,015-0,05$ მ/(ტ·წთ) ინტენსიურობით. დნობის ხანგრძლივობის პირველი 30 %-ის განმავლობაში აზოტის მიწოდებას ზრდიან $0,02-0,15$ მ/(ტ·წთ)-მდე, ხოლო გაქრევის შუაში (გაქრევის საერთო ხანგრძლივობის 30–65 %) ამცირებენ $0,02-0,06$ მ/(ტ·წთ)-მდე, გაქრევის დარჩენილ დროში ისევ ზრდიან $0,12-0,3$ მ/(ტ·წთ)-მდე.

გაქრევის დამთავრებამდე 2–4 წუთით ადრე აზოტის ნაცვლად მიაწოდებენ არგონს. მისი ხარჯი დამოკიდებულია ნახშირბადის სასურველ კონცენტრაციაზე მზა ფოლადში. იმ შემთხვევაში როდესაც აღნობენ 0,12 % და ნაკლები ნახშირბადის შემცველ ფოლადს, არგონის ხარჯია $0,12-0,3$ მ/(ტ·წთ). შედარებით მაღალ-ნახშირბადიანი ფოლადის გამოდნობის დროს არგონის ხარჯს ამცირებენ $0,02-0,08$ მ/(ტ·წთ)-მდე.

თუ დნობის პროცესში ადგილი აქვს ლითონის ამოსროლებს, ზრდიან აზოტის ხარჯს.

ჟანგბადის გაქრევის დამთავრების შემდეგ სასურველია ფსკერული ქვინებით 1–3 წთ განმავლობაში $0,3$ მ/(ტ·წთ) ხარჯით არგონის შებერვა. ეს ღონისძიება ხელს უწყობს ლითონიდან

ფოსფორისა და გოგირდის მოშორებას, წიდაში კი — რკინის ქვეჟანგის წილის შემცირებას, ვინაიდან იგი იხარჯება ნახშირბადის ამოწვასზე შემდეგი რეაქციით:



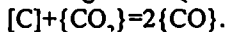
ძალზე დაბალნახშირბადიანი ფოლადის გამოღრობისას აუცილებელია არგონის გაქრევა 2–6 წუთის განმავლობაში, რაც უზრუნველყოფს ნახშირბადის ამოწვას, წილის დაქანგულობისა და რკინის ნამწვის შემცირებას.

ლითონისა და წილის სინჯების ასაღებად ანდა ტემპერატურის გასაზომად კონვერტერის „წაქცევისას“ ფსკერული ქმინებით უბერავენ ახოტს ან არგონს 0,02–0,08 მ³/(ტ·წთ) ხარჯით. ლითონის გამოშვებისას, ციკხვის ნახვერამდე შევსების შემდეგ არგონის ნაცვლად იწყებენ ახოტის მიწოდებას 0,015–0,05 მ³/(ტ·წთ) ხარჯით.

სხვა ქვეყნებში ფსკერული ქმინების გამოყენებისას ნეიტრალური აირების შებერვა გრძელდება ჟანგბადის გაქრევის მთელი ხნის განმავლობაში, ფორიანი ცეცხლგამძლე ბლოკებით მიწოდებისას — მთელი დნობის მანძილზე ან ჟანგბადის გაქრევის დასრულებამდე. ხშირად ჟანგბადის გაქრევის დამთავრების შემდეგ აბაზანის არევის მიზნით ხდება ნეიტრალური აირების შებერვა ქვემოდან 1–2 წუთის განმავლობაში. ამ დროს დამატებით იჟანგება ნახშირბადიც წიდაში მყოფი რკინის ქვეჟანგით და მცირდება ფოსფორისა და გოგირდის კონცენტრაციები. მაგალითად, ლბე პრაქცესით გამოდნობილი ლითონი ჟანგბადის გაქრევის ბოლოს შეიცავდა 0,21 % C; 0,15 % Mn; 0,026 % P და 0,019 % S. მაგრამ დნობის ბოლოს არგონით 2-წუთიანი გაქრევის შემდეგ ლითონის შედგენილობა შეიცვალა და გახდა 0,12 % C; 0,13 % Mn; 0,013 % P და 0,015 % S.

დაბალნახშირბადიანი ფოლადის გამოღრობისას კომბინირებული გაქრევა საჭიროების შემთხვევაში უზრუნველყოფს 0,03 % C-ს შემცველი ლითონის მიღებას ლითონის გადაქანგვის გარეშე. ნახშირბადის კონცენტრაციის შემდგომი შემცირებისათვის საჭიროა ამრევი გაქრევა 4–6 წუთის განმავლობაში.

არგონისა და ახოტის ნაცვლად ხშირად იყენებენ კონვერტერიდან გამოშვებული CO-სა და CO₂-ის შემცველი აირებით გაქრევას. ნახშირორჟანგის გამოყენების დადებით მხარეს შეადგენს მისი ურთიერთქმედება ლითონში გახსნილ ნახშირბადთან



ამ დროს ორჯერ იზრდება აირის მოცულობა და მის მიერ შესრულებული არევის მუშაობა. გარდა ამისა, ნახშირორჟანგის თერმული დისოციაკცია ქმინების მახლობლად ახდენს გამაცი-

ვებულ გავლენას და ხელს უწყობს ფსკერის მედეგობის გაზრდას.

ჟანგბადის კომბინირებული გაქრევა ფსკერიდან ინერტულ აირებთან ერთად, ჟანგბადის ზემოდან გაქრევასთან შედარებით, ხასიათდება მთელი რიგი დადებითი მომენტებით. მათგან ძირითადია წიდის აქაფებისა და ამოსროლების შემცირება; წიდის დაბალი დაჟანგულობა დნობის მთელი ხანგრძლივობისას; ვარგისი ლითონის გამოსაუღის ზრდა; მანგანუმის ნაშვების შემცირება; ფოსფორისა და გოგირდის სრულად მოცილება, ჯართის რაოდენობის გაზრდა კაზმში კონვერტერის სიღრმეში ნახშირჟანგის დაწვის შედეგად გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე.

3.2.19. ვანადიუმიანი თუჯების გადამუშავება კონვერტერში

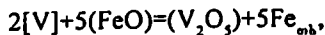
ყოფილ საბჭოთა კავშირში გავრცელებული ტიტან-მაგნეტიტური მადნები გარკვეული რაოდენობით შეიცავს ისეთ ძვირფას ელემენტს, როგორცაა ვანადიუმი. ასეთი მადნებიდან გამოდნობილი თუჯები გარკვეული რაოდენობით შეიცავს ამ ელემენტებს. კუსინის საბადოს მადნიდან მიღებულ თუჯშია 0,5–0,55 % V, ხოლო კაიკანარის საბადოს მადნიდან მიღებულში – 0,38–0,48 % V.

ვანადიუმიანი თუჯების კონვერტერული გადამუშავების მიზანს წარმოადგენს ვანადიუმით მდიდარი წიდის მიღება, რომელიც შემდგომში გამოიყენება ფეროვანადიუმის გამოსაღობად. ამავე დროს მიიღება ლითონური ნახევარპროდუქტი, რომელიც გამოიყენება საკაშიე მასალად ფოლადის წარმოებაში მარტენის დემელეებში ან კონვერტერებში. ამრიგად, ვანადიუმიანი თუჯის კონვერტერული გადამუშავება ფაქტიურად წარმოადგენს დუპლექს-პროცესს.

კუსინის საბადოდან გამოდნობილი ვანადიუმიანი თუჯი გადამუშავდებოდა ჩუსოვოს მეტალურგიულ ქარხანაში ჰაერზე მომუშავე კონვერტერში. თუჯის გადამუშავების შედეგად მიღებული წიდა შეიცავდა 14–15 % ვანადიუმის ხუთჟანგს (V_2O_5).

ნიჟნი-ტაგილის მეტალურგიული კომბინატის კონვერტერულ საამქროში შეიმუშავეს კაიკანარის საბადოდან მიღებული ვანადიუმიანი თუჯის გადამუშავების ტექნოლოგია სედა შებერვით მომუშავე ჟანგბად-კონვერტერებში.

ვანადიუმის დაჟანგვა წიდაში მყოფი რკინის ქვეჟანგით ეგზოთერმული პროცესია:



$$\Delta H_{1873}^0 = -331000 \text{ ჯ/მოლი.}$$

წონასწორობის მუდმივას გამოსახელებიდან

$$K = \frac{(a_{V_2O_5})}{[V]^2 (a_{FeO})^5}$$

ვანადიუმის განაწილება წიდასა და ლითონის შორის გამოი-
სახება შემდეგნაირად:

$$\frac{(a_{V_2O_5})}{[V]^2} = K \cdot (a_{FeO})^5$$

ამ დამოკიდებულების ანალიზი გვჩვენებს, რომ წიდაში ვანადიუმის უფრო სრულად გადასვლა საჭიროებს შედარებით დაბალ ტემპერატურას (რეაქცია ეგზოთერმულია და ამ დროს მაღალი იქნება წონასწორობის მუდმივა K) და წიდას მაღალ დაქანებულობას. ეს მოსაზრებანი საფუძვლად დაედო ნიუნი-ტაგი-ლის მეტალურგიულ კომბინატში ვანადიუმიანი თუჯების გადა-
მუშავების ტექნოლოგიას.

კონვერტერში ჩაასხამენ 100–120 ტ შემდეგი შედგენილობის ვანადიუმიანი თუჯს: 4,4–4,9 % C; 0,40–0,55 % Si; 0,20–0,35 % Mn; 0,20–0,35 % Ti; 0,38–0,48 % V; 0,05–0,11 % P; 0,025–0,058 % S; 0,04–0,06 % Cr. გაქრევას ატარებენ 99 % სისუფთავის ტექნიკური ჟანგბადით, 1,0–1,2 მგნ/მ² (10–12 ატ) წნევით. გაქრევის ინტენსიურობაა 150–200 მ³/წთ. წენარი აბაზანის ზედაპირიდან ქმინი დაშორებუ-
ლია 0,7–1,0 მ-ით. გაქრევა, რომლის ხანგრძლივობაც დამოკიდე-
ბულია თუჯის შედგენილობასა და შებერვის ინტენსიურობაზე, გრძელდება 8–13 წუთს. ჟანგბადის ხვედრითი (კუთრი) ხარჯია 14–18 მ³/ტ თუჯზე. ვარგისი ლითონის გამოსავალი იცვლება 92–95 %-ის ფარგლებში. გაქრევის შედეგად მიიღება შემდეგი შედგენილობის ვანადიუმიანი წიდა: 14–20 % V₂O₅; 15–20 % SiO₂; 33–44 % Fe საერთო; 2–3 % Cr₂O₃; ვანადიუმის ამოკრების კოეფიციენტი 0,92–0,93.

გაქრევის შედეგად წიდასთან ერთად მიიღება შემდეგი შედგენილობის ლითონური ნახევარპროდუქტი: 3,2–3,8 % C; 0,02–0,04 % V; 0,05–0,12 % P; 0,025–0,070 % S.

ლითონსა და წიდას ერთმანეთისაგან განაცალკევებენ კონვერ-
ტერიდან გამოშვების პროცესში. ამის შემდეგ წიდას აგზავნიან ფეროვანადიუმის გამოსადნობად, ხოლო ლითონურ ნახევარპრო-
დუქტს მიაწოდებენ თხევადი თუჯის ნაცვლად მარტენის საამქროს
ან მყორე კონვერტერს ფოლადად გადამუშავებისათვის.

პირველი კონვერტერიდან მიღებული ნახევარპროდუქტის ტემპერატურაა 1350–1420 °C. მეორე კონვერტერში ჩასხმამდე ლითონი ცივდება 30–40°-ით. მეორე კონვერტერში ჟანგბადით გაქრვისას სითბო ძირითადად გამოიყოფა ნახშირბადის ამოწვის ეგზოთერმული რეაქციის წყალობით და ლითონში სითბოს სხვა შემტანი ელემენტების უქონლობის მიუხედავად, იგი ხურდება 1600–1650 °C ტემპერატურამდე, რისი მიღწევაც შეუძლებელია პაერით გაქრვის დროს.

ნახევარპროდუქტის გაქრვის დაწყებასთან ერთად წილის წარმოქმნისათვის კონვერტერში შეაქვთ კირი, მდნობი შპატი და რკინის მადანი ან დაფლუსებული ავლომერატი.

გაქრვის დასაწყისში ქვინი წყნარი აბაზანის ზედაპირიდან დაშორებულია 1,5–2,0 მ. გაქრვის ინტენსიურობა პირველი 3–5 წუთის განმავლობაში არ აღემატება 150–170 მ³/წთ. შემდეგ ქვინს დაწვევენ და დაუახლოებენ აბაზანის ზედაპირს 0,7–1,0 მ მანძილზე, ხოლო ჟანგბადის მიწოდების ინტენსიურობას ზრდიან 180–200 მ³/წთ დონემდე. გაქრვის დასასრულისთვის ფოსფორის შემცველობა ლითონში მცირდება 0,01–0,02 %-მდე, გოგირდისა კი – თავდაპირველი კონცენტრაციის 10–20 %-მდე. ჟანგბადის საერთო ხარჯია 55 მ³/ტ ფოლადზე, ხოლო ვარჯისი ლითონის გამოსავალი – 87–89 %.

3.2.20. ქრომისა და ნიკელის შემცველი თუჯის გადამუშავება

ქრომისა და ნიკელის შემცველი თუჯის გადამუშავება ხდება ღუპლექს-პროცესით: კონვერტერი–მარტენის ღუმელი. ამ დროს ქრომის დაჟანგვის პროდუქტი წარმოქმნის რკინის ქრომიტს ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$). მისი დნობის ტემპერატურაა 2100 °C. ასეთი ნაერთი იწვევს წილის სიბლანტის ზრდას, ძნელია მისი მოშორება ღუმელიდან და მანეე ზემოქმედებას ახდენს ღუმელის ცეცხლგამძლე ამონაგზე. ამიტომ დექრომაცია ტარდება კონვერტერში, ხოლო მიღებული ლითონური ნახევარფაბრიკატის გადამუშავება – მარტენის ღუმელში.

თავდაპირველად გამოიყენებოდა სქემა: ბესემერი–მარტენი. შემდგომში დამუშავდა ხერხი: ჟანგბად-კონვერტერი–მარტენი.

ნიუო-ტულის მეტალურგიულ ქარხანაში ჩატარდა გამოკვლევები ფუძე ჟანგბად-კონვერტერში ქრომ-ნიკელიანი თუჯების დექრომაციის შესასწავლად. შესწავლილი იყო (2,5–3,0 % Cr და 0,7–0,9 % Ni) ქრომ-ნიკელიანი თუჯიდან 0,8–1,0 % Ni შემცველი

მცირედლევირებული ფოლადების მიღების შესაძლებლობა. პროცესი მიმდინარეობს 92–96 %-იანი სისუფთავის ტექნიკური ჟანგბადის გამოყენებით. ჟანგბადის ხარჯი კონვერტერის ტევადობის მიხედვით იცვლებოდა 31–45 მ³/წთ ფარგლებში.

დნობის დაწყების წინ კონვერტერში ტვირთავდნენ კირის საერთო ხარჯის ნახევარს, მეორე ნახევარს კი ამატებდნენ შუალედური წილის მოხდის შემდეგ. წილის მოხდის გარეშე მუშაობა არ იყო მიზანშეწონილი მისი დიდი რაოდენობით წარმოქმნის შედეგად დნობის სვლის გართულებისა და რკინის დიდი რაოდენობით კარგვის გამო.

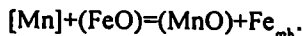
ჟანგბადის ხარჯი შეადგენდა 70–85 მ³/ტ თუჯზე. ფოლადის გამოსაყალი არ აღემატებოდა 81,5 %-ს; აზოტის რაოდენობა ლითონში იყო 0,007 %, ხოლო ქრომის ჟანგის კონცენტრაცია წილაში კი – 12–13 %.

ნიკელის საჭირო რაოდენობამდე შეესების მიზნით გაქრევის დაწყების წინ მას ამატებდნენ კონვერტერში. ფეროქრომს და ფეროსილიციუმს ახურებდნენ ფოლადის ჩამოსასხმელი ციცხვის ფსკერზე, ფერომანგანუმს კი ამატებდნენ კონვერტერიდან ციცხვში გამოშვების დროს.

3.2.21. მაღალმანგანუმიანი თუჯების გაქრევა

მაღალმანგანუმიანი თუჯების გადამუშავებისას მიზნად ისახავენ მანგანუმით მდიდარი წილების მიღებას. ასეთი წილები შემდეგ გამოიყენება ნედლეულის სახით მანგანუმიანი ფეროშენადნობების წარმოებაში. იმისათვის რომ ეკონომიურად მიზანშეწონილი იყოს ფეროშენადნობების მიღება ასეთი წილებიდან, ისინი უნდა აკმაყოფილებდნენ სამ ძირითად პირობას: 1) მანგანუმის ქვეჟანგის შემცველობა წილაში არ უნდა იყოს 45 %-ზე ნაკლები; 2) წილაში მყოფი მანგანუმის კონცენტრაციის ფარდობა რკინის რაოდენობასთან უნდა იყოს 6,5-ზე მეტი; 3) ფოსფორის რაოდენობის ფარდობა მანგანუმის რაოდენობასთან უნდა იყოს 0,0035-ზე ნაკლები.

კონვერტერში გაქრევისას მანგანუმი იჟანგება წილაში მყოფი რკინის ქვეჟანგით შემდეგი ეგზოთერმული რეაქციით:



ამ რეაქციის წონასწორობის მუდმივას ტემპერატურული დამოკიდებულებიდან

$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{(MnO)}{[Mn](FeO)} = \frac{6440}{T} - 2,95.$$

წიდასა და ლითონის შორის მანგანუმის განაწილების კოეფიციენტი შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\frac{(MnO)}{[Mn]} = K_{Mn} \cdot (FeO).$$

მიღებული დამოკიდებულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მანგანუმით მდიდარი წილების მისაღებად საჭიროა შედარებით დაბალი ტემპერატურა (ამ დროს K_{Mn} მაღალი იქნება) და რკინის ქვეჟანგის მაღალი შემცველობა წიდაში. მაგრამ უკანასკნელი პირობა ეწინააღმდეგება იმ პირობას, რომ წიდაში გადასული მანგანუმის რაოდენობის რკინის რაოდენობასთან ფარდობა უნდა იყოს 6,5-ზე მეტი. ამიტომ მანგანუმით მდიდარი წილის მიღება თუჯის გაქრევის პროცესში ძირითადად უნდა მოხდეს აბაზანის ტემპერატურის რეგულირებით. ამ პირობის მისაღწევად გამაცივებლის სახით იყენებენ ფოლადის ჯართს.

წიდაში ფოსფორის დაბალი რაოდენობის მისაღებად ღნობის დასაწყისში არ იყენებენ კირს, რათა მან არ მიიერთოს ფოსფორის ანჰიდრიდი და არ გაზარდოს წიდაში ფოსფორის რაოდენობა. ეს ღონისძიება ხელს უწყობს აგრეთვე წილის რაოდენობის შემცირებას და წიდაში მანგანუმის ქვეჟანგის კონცენტრაციის გაზრდას.

მაღალმანგანუმიანი თუჯის გაქრევა ჩატარდა მაგნეზიტის ამონაგთან 10 ტ ტევადობის კონვერტერში. გამოყენებული იყო შემდეგი შედგენილობის თუჯი: 3,8–4,4 % C; 3,8–7, 3% Mn; 0,36–1,00 % Si; 0,06–0,17 % P; 0,023–0,045 % S. კონვერტერში თუჯის ჩასხმამდე ტვირთავდნენ ფოლადის ჯართს თუჯის საერთო მასის 22–36 %-ის რაოდენობით. ჯართის ხარჯს განსაზღვრავდა თუჯის შედგენილობა. გაქრევის პირველ ნახევარში კონვერტერში არ ამატებდნენ კირს. მანგანუმიანი წილის მოხდისას ლითონის ტემპერატურა იყო 1500–1520 °C. უანგბადის ხარჯი შეადგენდა 30–40 მ³/წთ. ქმინის ბუნიკის დაცილება წყნარი აბაზანის ზედაპირიდან იცვლებოდა 120–300 მმ-ის ფარგლებში. გაქრევის პირველი პერიოდი გრძელდებოდა 8 წუთს.

ამის შემდეგ ლითონს გამოუშვებდნენ საჩამოსხმო ციციხეში, წიდას კი – მისთვის განკუთვნილ ფიალაში. ლითონის ნახევარპროდუქტში იყო 2,0–2,3 % C. მას აბრუნებდნენ კონვერტერში და აგრძელებდნენ გაქრევას ფოლადის მისაღებად. მეორე პერიოდის ხანგრძლივობა საშუალოდ შეადგენდა 9 წუთს.

5,7 % მანგანუმის შემცველი თუჯის გაქრევის შედეგად მიიღეს 60,5 % MnO-ის შემცველი წიდა. მისი რაოდენობა იყო გადამუშავებული თუჯის მასის 7,25 %, მანგანუმის ამოღების ხარისხი – 80 %, წიდაში მანგანუმის ფარდობა რკინასთან – 4,61, ხოლო ფოსფორის ფარდობა მანგანუმთან 0,0018. მანგანუმთან წიდას შედგენილობა ასეთია: 60,5 % MnO; 9,5 % FeO; 4,05 % Fe₂O₃; 17,0 % SiO₂; 5,2 % CaO; 0,19 % P₂O₅, საბოლოო ლითონის შედგენილობა კი – 0,08 % C; 0,63 % Mn; 0,019 % S; 0,047 % P. რაც შეეხება საბოლოო წიდას, იგი შემდეგი შედგენილობისა იყო: 27,6 % MnO; 16,2 % FeO; 10,0 % Fe₂O₃; 9,2 % SiO₂; 31,9 % CaO; 1,13 % P₂O₅. ჟანგბადის საერთო ხარჯი იყო 62,3 მ³/ტ თუჯზე, ჯართისა – თუჯის მასის 26,4 %, ხოლო კირისა კი – თუჯის მასის 5,3 %.

მაღალმანგანუმიანი თუჯის გადამუშავების ჟანგბად-კონვერტერული ხერხი გამოიყენეს ბულგარეთის სახალხო რესპუბლიკაში კრემიკოვოს მეტალურგიულ კომბინატში.

IV ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

მარტინისა და სხვა პროცესები

თ ა ვ ი I

მარტინის პროცესში გამოყენებული მასალები

4.1.1. საკაზმე მასალები

ფოლადის მეტალურგიაში ლითონურ საკაზმე მასალად გამოიყენება ფოლადისა და თუჯის ჯართი, აგრეთვე თხევადი და შოთური (მყარი) გადასამუშავებელი თუჯი.

ფოლადისა და თუჯის ჯართი წარმოიშობა მეურნეობის ყველა დარგში და ქიმიური შედგენილობით, დანიშნულების, ხარისხის, გაბარიტებისა და სხვა მანვენებლების მიხედვით იყოფა:

ა) სამ კატეგორიად: ფოლადის ჯართი, თუჯის ჯართი და საბრძმედე მისართი;

ბ) ორ კატეგორიად: A – არალეგირებული და B – ლეგირებული;

გ) 82 ჯგუფად: არალეგირებული 9, ლეგირებული 73;

დ) სამ კლასად: I, II, III, რომელიც განისაზღვრება მათი სისუფთავის, დამზადების ადგილით (ადგილობრივი ქარხნის ჯართი თუ შემოტანილი) და გაბარიტებით.

ლეგირებული ფოლადის ჯართს, რომელიც შეიცავს ქრომს, ნიკელს, მოლიბდენს, ვოლფრამსა და სხვ. ძვირადღირებულ ლითონებს, საკაზმე ეზოში ათავსებენ ცალკე გამოყოფილ ადგილზე. ასევე ცალკე გამოყოფილ ადგილზე ათავსებენ გოგირდოვან ჯართს, კალისა და თუთიის შემცველ ჯართს. ასეთი ჯართი დაბალხარისხოვან საკაზმე მასალებს მიეკუთვნება. დნობის დროს თუთია ორთქლდება, იუანგება და თუთიის უანგის სახით დამღუპველად მოქმედებს ფოლადსა და დნობის ღუმელის ცეცხლგამძლე ამონაგზე. კაზმში მოხვედრილი კალა თითქმის მთლიანად გადადის ფოლადში და დნობის დაბალი ტემპერატურის გამო იწვევს ე.წ. „წითელმეტეხოვას“, ასევე მანებელია გოგირდიც. ამიტომ გოგირდიანი ჯართის მიწოდება კაზმში მხოლოდ მცირე ულუფებითაა დასაშვები, ანდა მიეწოდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც სპეცია-

ლურად აღნობენ მაღალგოგირდიან ფოლადებს. დაუშვებელია ტყვიის შემცველი ჯართის გამოყენება. დიდი კუთრი წონის გამო, ტყვია ილეკება ღუმელის ქვედზე, შედის მის ვიწრო ნაპრალებში, იწვევს ამონაგის რღვევას და ვადაზე ადრე გამოჰყავს იგი მწყობრიდან.

დაბალი ხარისხის ჯართს განეკუთვნება აგრეთვე მსუბუქი ჯართი (თუნუქი, ბურბუშელა, მანქანის ძარა და სხვა). აუცილებელია ასეთი ჯართის წინასწარი დაპაკეტება დამწნებ მანქანაში და შემდგომ მისი მიწოდება ფოლადსადნობ ღუმელში. უნდა აღინიშნოს, რომ ჯართის ღირებულება ძლიერ მცირდება თუ იგი დანაგვიანებულია ლამით ან სხვა მსგავსი მასალით.

გადასამუშავებელი თუჯი თხევად ან მყარ (შოთის სახით) მდგრძარეობში წარმოადგენს ლითონური საკაშიმე მასალის ძირითად ნაწილს. ფოლადის მეტალურგიაში გამოიყენება სხვადასხვა მარკის თუჯები, რომელთა კლასიფიცირება ხდება მათში Si, Mn, S და P-ის შემცველობის მიხედვით (ГОСТ 805-80).

გადასამუშავებელი თუჯების მარკებში ნახშირბადის შემცველობა მერყეობს 3,8-4,2 % ზღვრებში; სილიციუმის – 0,5-დან 1,2 %-მდე; მანგანუმის – 0,5-დან 1,0 %-მდე, ფოსფორის – 0,1-დან 0,3 %-მდე; გოგირდის 0,01-დან 0,025 %-მდე.

სილიციუმის გაზრდილი შემცველობა გადასამუშავებელ თუჯში იწვევს კირქვისა და მადნის ხარჯის გაზრდას, რასაც თან ახლავს დიდი რაოდენობით წიდის წარმოქმნა და დნობის პერიოდის გახანგრძლივება. კონვერტერში გადასამუშავებელ თუჯებში სილიციუმის რაოდენობა მეტია, რადგან ჟანგბადით მისი წვის დროს გამოიყოფა სითბოს დიდი რაოდენობა და ხდება ლითონის ტემპერატურის გაზრდა. დღეისათვის გამოიყენება დაბალმანგანუმიანი გადასამუშავებელი თუჯის წარმოების ტენდენცია, რადგან ასეთი თუჯი იძლევა მაღალ ტექნიკურ-ეკონომიკურ ეფექტს როგორც საბრძმედ, ასევე ფოლადსადნობ საამქროებში.

4.1.2. ფეროშენადნობები

ფოლადის მეტალურგიაში ლითონის განუანგვისა და ლეგირებისათვის გამოიყენება ფეროშენადნობები – რკინის შენადნობი პერიოდული სისტემის სხვადასხვა ლითონურ თუ არალითონურ ელემენტებთან. დღეისათვის ფეროშენადნობების ქარხნების მიერ ათვისებული და სასაქონლო დანიშნულებით არის გამოყენებული

100-ზე მეტი სხვადასხვა სახისა და მარკის მარტივი თუ რთული შედგენილობის შენადნობი. მათ რიცხვს განეკუთვნება მსუბუქი (Al, Ba, B, Ca, Mg, Sr, Ti), იშვიათი (V, W, Mo, Ce, La, Nb, Se, Ta), მძიმე (CO, Mn, Ni, Cr) ლითონები და არალითონები (Si, P, N).

თანამედროვე ფოლადსადნობ საამქროებში ძირითადად გამოიყენება შემდეგი შენადნობები:

1. ბრძმედის ფეროსილიციუმი (გამოიდნობა ბრძმედის ღუმელში). იგი ორი მარკისაა: C_{H15} და C_{H10} (მას.% Si – 9,0-13,0, $Mn \leq 3,00$, C – 1,2-1,5, $P < 0,15$, $S < 0,04$).

2. კრიალა თუჯი (გამოიდნობა ბრძმედის ღუმელში). არის სამი მარკის: 3 ψ 1, 3 ψ 2, 3 ψ 3, (მას. %): Mn – 10-25. Si < 2; P 0,18-0,22; S 0,03.

3. ბრძმედის ფერომანგანუმი. გამოიყენება ორი მარკა: Mn5 და Mn8 ფოსფორის შემცველობის მიხედვით თითოეულ მარკაში განარჩევენ ორ-ორ ჯგუფს.

4. სილიკომანგანუმი (მიიღება ელექტროლუმელებში). გაერცელებულია სილიკომანგანუმის ხუთი მარკა: CM_{H26} , CM_{H20} , CM_{H20} , CM_{H17} , CM_{H14} და CM_{H10}). ციფრები განსაზღვრავენ სილიციუმის შემცველობას შენადნობში.

5. ფეროსილიციუმი (გამოიდნობა ხდება ელექტროლუმელებში). გაერცელებულია მისი შვიდი მარკა: $\Phi C 90$, $\Phi C 75_{\psi}$, $\Phi C 75$, $\Phi C 65$, $\Phi C 45$, $\Phi C 25$ და $\Phi C 18$ (ციფრები გვიჩვენებს სილიციუმის პროცენტულ შემცველობას შენადნობში).

6. მცირენახშირბადიანი ფერომანგანუმი (მიიღება ელექტროლუმელებში) მარკა $\Phi M 0,5$ (ნახშირბადის შემცველობა არაუმეტესი 0,5 %), Mn – 80 %, Si – 2,0 %, P – 0,20 %, S – 0,03 %).

7. საშუალონახშირბადიანი ფერომანგანუმი. ოთხი მარკის: $\Phi M_{H1,0A}$, $\Phi M_{H1,0}$, $\Phi M_{H1,5}$, $\Phi M_{H2,0}$, (Mn-75-85 %, Si-2,0 %, P-0,1-0,35 %, S-0,03 %).

8. ნახშირბადიანი ფერომანგანუმი. რვა მარკის: ΦM_{H78A} , ΦM_{H78} , ΦM_{H78K} , $\Phi Mn75C6$, ΦM_{H75C4} , $\Phi Mn75C9$, ΦM_{H75} , $\Phi Mn70$). მანგანუმის შემცველობა 75-82 %, Si - 1-9 %, C - 6-7 %.

9. სილიკოკალციუმი. არსებობს ამ შენადნობის სამი მარკა: $KaCa0$, $KaCa1$ და $KaCa2$. კალციუმის შემცველობა იცვლება 10-30 %-მდე.

10. ფეროქრომი. არსებობს ფეროქრომის 10 მარკა: X_{ψ} - 0000 X_{ψ} - 6. ამ მარკებში ქრომის შემცველობა იცვლება 60-65 % ზღვრებში. ხოლო ნახშირბადის – 0,06-დან 6 %-მდე.

11. ფეროვოლფრამი. გამოიყენება სამი მარკა: B1, B2, და B3, ვოლფრამის შემცველობით 65-70 %.

12. ფერომოლიბდენი. გამოიყენება სამი მარკა: Mo1, Mo2, Mo3, მოლიდენის შემცველობით 55 %.

13. ფეროვანადიუმი. გამოიყენება სამი მარკა Вd1, Вd2, Вd3 ვანადიუმის შემცველობით 35 %.

14. ფეროტიტანი. გამოიყენება ხუთი მარკა: Ti0, Ti1, Ti2, TiB1, TiB, ტიტანის შემცველობით ≥ 23 %.

15. ალუმინი. გამოიყენება ოთხი მარკა: Al1; Al2; Al2Ф; Al3. ალუმინის შემცველობა იცვლება 96–87 % ფარგლებში.

ბოლო დროს გაერცვლება პოვა აგრეთვე რთული შედგენილობის კომპლექსურმა შენადნობებმა: AMS (ალუმინი, მანგანუმი, სილიციუმი), KMK (სილიციმი, მანგანუმი, კალციუმი), AMSK (ალუმინი, მანგანუმი, სილიციუმი, კალციუმი) და სხვა.

4.1.3. მეტალიზებული ნედლეული

ლითონურ საკასმე მასალებს განეკუთვნება აგრეთვე მეტალიზებული ნედლეული, რომელიც მიიღება მადნის კონცენტრატის პირდაპირი აღდგენით მყარი ან აიროვანი აღმდგენლით.

მყარ აღმდგენლად გამოიყენება კოქსწერილა, აიროვან აღმდგენლად კი – წყალბადი ან ნახშირჟანგი (CO). პროცესის შედეგად მიიღება ნაჭროვანი ფოროვანი პროდუქტი, რომელშიც აღდგენილი რკინის რაოდენობა მერყეობს 87–95 %-ის ფარგლებში. მეტალიზებული გუნდები გამოიყენება ფოლადის ჯართის ნაცვლად როგორც ელექტრორკალურ ღუმელებში, ასევე კონვერტერებშიც. მეტალიზებული გუნდების რაოდენობა კონვერტერების კაზმში არ აღემატება 25 %-ს, ხოლო ელექტრორკალური ღუმელების კაზმში 100 %-მდე შეიძლება იქნეს გაზრდილი. ასეთი ნედლეული საკმაოდ სუფთაა მაგნე მინარევეებისაგან, განსაკუთრებით კი – ფერადი ლითონების ნარჩენებისაგან. ამიტომ, ფოლადის ჯართის ნაწილობრივი ჩანაცვლება მეტალიზებული გუნდებით კარგი წინა პირობაა მაღალი ხარისხის ფოლადის მისაღებად.

4.1.4. დამუანგველები

ფოლადის მეტალურგიაში დამუანგველებად გამოიყენება ძირითადად რკინის (ზოგჯერ მანგანუმის) მადნები, რკინის ხენჯი, მადნური ბრიკეტები და აიროვანი ჟანგბადი.

რკინის მადნებიდან ძირითადად გამოიყენება ადვილად აღსადგენი მადნები, რომელთა შედგენილობაში რკინის შემცველობა მაღალია (>60 %). მადანი უნდა ხასიათდებოდეს განსაზღვრული ნატროვანებით, წერილმანის მინიმალური რაოდენობით, უნდა იყოს მშრალი და ჰქონდეს საკმარის დიდი კუთრი წონა, რათა ადვილად ჩაიძიროს წიდაში და შეხებაში მოვიდეს ლითონის ზედაპირთან, გარდა ამისა, გოგირდის, ფოსფორის და კაჟმიწის რაოდენობა მადანში უნდა იყოს მინიმალური.

დღეისათვის გამოიყენება შემდეგი ქიმიური შედგენილობის რკინის მადანი (მასური %):

Fe_2O_3 - 62,2-87,5, MnO - 0,5-1,9, SiO_2 - 3,8-11,0, P_2O_5 - 0,05, Al_2O_3 - 1,0-3,0, CaO - 0,2-1,2, MgO - 0,1-0,6, S - 0,02-0,04.

მანგანუმის მადანს იყენებენ კაზში მანგანუმის მცირე შემცველობის დროს. დნობის დროს მაღალი ტემპერატურის პირობებში მანგანუმი ნაწილობრივ აღდგება და წიდიდან გადადის ლითონში. მანგანუმის მადანი ნაკლებად აქტიური დამჟანგველია რკინის მადანთან შედარებით MnO -ს უფრო ძნელი აღდგენადობის გამო. ფოლადის მეტალურგიაში დამჟანგველად იყენებენ შემდეგი შედგენილობის გამდიდრებულ მანგანუმის მადანს, %:

Mn - 43-48*, SiO_2 - 6,67-8,11, Al_2O_3 - 1,31-2,14, CaO - 0,87-3,03, MgO - 0,24-1,46, Fe_2O_3 - 0,3-2,47, P_2O_5 - 0,3-0,4.

რკინის ხენჯი მიიღება საგლინაე და სამჭედლო საამქროების მახურებელ ღუმელებში ფოლადის ნამზადის ზედაპირის გადაწვის შედეგად. ხენჯში რკინა იმყოფება ძირითადად Fe_3O_4 -ის სახით. ამიტომაც უანგბადი მასში ნაკლებია და შედარებით ძნელად აღსადგენია. გარდა ამისა, ხენჯის მცირე კუთრი წონის გამო მისი დიდი ნაწილი რჩება წიდაში და ვერ აღწევს ლითონის აბაზანის ზედაპირამდე. ხენჯის ქიმიური შედგენილობა შემდეგია %:

Fe_3O_4 - 93-95, SiO_2 - 1,2-1,75, Al_2O_3 - 0,6-0,7, CaO - 1,4, MgO - 0,5-0,6, MnO - 1,4-1,5.

აგლომერატი წარმოადგენს რკინის მადნის ძირითად შემცველ დამჟანგავ გამომწვარ შეცხოვილ მასალას. მისი ქიმიური შედგენილობა შემდეგია, %:

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ - 80-82, SiO_2 - 6,2-6,5, Al_2O_3 - 2-4, CaO - 3-4, P - 0,04, S - 0,03-0,1.

აგლომერატის უპირატესობებია ქიმიური შემცველობის უცვლელობა, ტენის მცირე შემცველობა და დნობის დაბალი ტემპერატურა. იგი რკინის მადანთან შედარებით, უფრო სწრაფად დნება. ეს გარემოება აჩქარებს პირველადი რკინოვანი წილის

*. მანგანუმი მადანში არის Mn-ის უანგველების სახით.

წარმოქმნას, რაც ხელს უწყობს დეფოსფორაციის პროცესის განვითარებას.

ფართო გამოყენება პოვა დაფლუსებულმა, მაღალი ფუძიანობის აგლომერატმა ($\text{CaO/SiO}_2=1,4-2,5$), რომელიც ცვლის არა მარტო მადანს, არამედ ნაწილობრივ – კირქვასაც.

დაფლუსებული აგლომერატის გამოყენება მარტენის პროცესის კაზმში საგრძნობლად ამცირებს გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობას და უზრუნველყოფს დეფოსფორაციის ადრეულ ჩატარებას, თუმცა, ამ შემთხვევაში, პირველად მოხდის წიდას ფოსფორის გარდა, რკინის ჟანგეულებიც საკმაო რაოდენობით მიჰყვება, რაც უარყოფით მოვლენად ითვლება (დიდია რკინის დანაკარგი). დაფლუსებული აგლომერატის უარყოფით თვისებად უნდა ჩაითვალოს აგრეთვე მცირე კუთრი წონა რკინის მადანთან შედარებით. ამიტომ არ არის მიზანშეწონილი აგლომერატის გამოყენება აბაზანის პოლირებისათვის – ღუმელში ჩატვირთული აგლომერატის მნიშვნელოვანი ნაწილი რჩება წიდაში და ვერ აღწევს ლითონის ზედაპირამდე.

რკინის მადნის აგლომერატი რკინის მადნისაგან გამოირჩევა რკინის ქვეჟანგის (FeO) უფრო მეტი და რკინის ჟანგის (Fe_2O_3) უფრო ნაკლები შემცველობით. ამიტომაც აგლომერატში შედარებით ნაკლები რაოდენობის ჟანგბადი, რის შედეგადაც აგლომერატის ჟანგვითი უნარი ნაკლებია რკინის მადნის ჟანგვით უნართან შედარებით.

რამდენიმე ათეული წლის წინ დაიწვეს ფოლადის წარმოებაში ფქვილისებური რკინის მადნისა და მადან-კირქვიანი (დაფლუსებული) ბრიკეტების გამოყენება. ფოლადის წარმოებისათვის გამოსაყენებელ ბრიკეტებს წაყენებული აქვს გაზრდილი მოთხოვნები მექანიკური და მეტალურგიული თვისებების მიმართ. ამიტომ, დაწინებვის შემდეგ ტარდება ბრიკეტების გამოწვა ან ავტოკლაური დამუშავება და სხვა დამატებითი ოპერაციები. დაფლუსებული ბრიკეტების გამოყენება საგრძნობლად ცვლის მარტენის ღუმელში გადნობის პერიოდის სვლას. ჯერ კიდევ გახურების პერიოდში იწყება კირქვის ურთიერთქმედება რკინის მადანთან. თუჯის ჩასხმის შემდეგ ჩქარდება რკინა-კირიანი წიდის წარმოქმნა, რაც ხელს უწყობს წიდის ფუძიანობის სწრაფად ზრდას. ამის შედეგად ჩქარდება დეფოსფორაცია, დესილიკონიზაცია და სხვა პროცესები. ბრიკეტები, რკინის მადნის მსგავსად, ხასიათდება მაღალი დამჟანგველუნარიანობით. დაფლუსებული რკინის მადნის ბრიკეტებს იყენებდნენ ჩელიაბინსკის, კომუნარსკის, ჩერეპოვეცის, სეროვის, რუსთავისა და სხვა მეტალურგიულ ქარხნებში.

აიროვანი ჟანგბადი წარმოადგენს ყველაზე მარტივ და ამავე დროს ყველაზე სრულყოფილ დამჟანგველს. თანამედროვე კონვერტერებში ჟანგბადი სპეციალური წყლით საცივებელი სისტემით აღჭურვილი ქვინებით მიეწოდება ლითონის აბაზანის გასაქრევად. ელექტრორკალურ და მარტენის ღუმელებში აბაზანის გაქრევა ჟანგბადით ხდება, ასევე სპეციალური ქვინებით.

თხევადი ლითონის აბაზანის ჟანგბადით გაქრევის შედეგად, მყარდება ხელსაყრელი პირობები ფოსფორისა და გოგირდის მოცილებისათვის. ამავე დროს, ჟანგბადით გაქრევას თან ახლავს ე.წ. დნობის მტერის რაოდენობის საგრძნობი ზრდა, რომელიც ღუმელიდან ნამწვ პროდუქტებთან ერთად გაიტანება. დნობის მტვერი წარმოიქმნება თხევადი ლითონისა და შებერილი ჟანგბადის ურთიერთქმედების შედეგად მაღალი ტემპერატურის განვითარებისა (2200–2500 °C) და ლითონის აორთქლების გამო. ადგილი აქვს აგრეთვე თხევადი ლითონის ნაწილაკების გაშეფუებას და მათ დაჟანგვას. ყოველივე ეს ითვლება ჟანგბადით გაქრევის პროცესის უარყოფით მხარედ. პრაქტიკიდან ცნობილია რომ, რაც მეტია ლითონში ნახშირბადის შემცველობა, მით მეტი რაოდენობით წარმოიქმნება დნობის მტვერი. დნობის მტვერის წარმოქმნის შესამცირებლად ქარხანა „საპაროუსტალში“ გამოიყენეს ჟანგბად-წყლის ნარევით გაქრევა. წყლის მოლეკულების დისოციაციის ენდოთერმული ეფექტი იწვევდა გაქრევისა და ლითონის შეხების ადგილას ტემპერატურის შემცირებას და დნობის მტვერის ნაკლები რაოდენობით გამოყოფას.

4.1.5. დამატებითი მასალები

ფოლადის მეტალურგიაში საფლუსე ანუ წიდის წარმოსაქმნელ მასალებად გამოიყენება კირქვა, კირი, ბოქსიტი, შამოტი, შამოტის ნამტვრევები, მეორადი ალუმინის წარმოების ნარჩენი წიდა, მლღობი შპატი და სხვა.

კირქვა (CaCO₃). კირქვის გამოყენების შემთხვევაში ადგილი აქვს რეაქციას, რომელიც სითბოს შთანთქმით მიმდინარეობს

$$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$$

ამ რეაქციის განვითარების შედეგად, ლითონის აბაზანაში გამოიყოფა დიდი რაოდენობის CO₂, რაც იწვევს აბაზანის მექანიკურ არევას, საგრძნობლად უმჯობესდება სითბოგადაცემის პირობები და ჩქარდება მინარევების დაჟანგვა CO₂-ის ჟანგბადის ხარჯზე.

ხარისხოვან კირქვაში ფუჭი მინარეჟების (SiO_2 , P_2O_5 , S და სხვა) რაოდენობა არ უნდა აღემატებოდეს 2.5 %-ს. მაღალხარისხოვანი კირქვის ქიმიური შედგენილობაა, %:

CaO - 51-54, SiO_2 - 0,6-2,0, Al_2O_3 - 0,1, Fe_2O_3 - 0,2 MgO - 0,6, P_2O_5 - 0,01-0,02, SO_3 - 0,2-0,25,

დანაკარგები გახურებისას (აქროლადი CO_2) - 42-43 %.

კირი (CaO). მეტალურგიული კირი მიიღება კირქვის გამოწვევით სპეციალურ ღუმელებში. კირქვის გამოსაწეველად გოგირდოვანი კოქსის გამოყენება დაუშვებელია, ვინაიდან ეს გამოიწვევს კირში გოგირდის შემცველობის გაზრდას.

კირი სწრაფად ითვისებს დიდი რაოდენობით ტენს (იგი პიგროსკოპულია) და გადადის ფხვნილოვან მდგომარეობაში $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -ის სახით. ამიტომ ასეთი კირის გამოყენება მარტენის ღუმელში დაუშვებელია, ვინაიდან ამ შემთხვევაში კირის ფხვნილი საკვამლე აირებს გადააქვთ საწიღურებში და რეგენერატორების წყობურებში, რაც იწვევს მათ ადრეულ გამოსვლას ხმარებიდან. ღუმელში პოლირების დროს ხდება მხოლოდ ახლად გამოწვარი კირის გამოყენება ნატრიონ მდგომარეობაში. მეტალურგიული კირის ქიმიური შედგენილობა უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მონაცემებს, %:

CaO - 80-84,5; $\text{SiO}_2 \leq 4,5$; $\text{MgO} \leq 4,5$; $\text{S} \leq 0,2$.

მლღობი შპატი გამოიყენება ბლანტი წიდის გასათხევადად. მლღობი შპატის ძირითადი შემადგენელი ნაწილია CaF_2 . რომლის შემცველობა 90-95 %-ს აღწევს.

მლღობი შპატის გამოყენების დროს ადგილი აქვს ფოლადის შესამჩნევ დესულფურაციას, რაც გამოწვეულია წიდის აქტიურობის გაზრდით.

მლღობი შპატის ღუმელში გამოყენებას თან ახლავს ამ ფლუისის დამღუპველი მოქმედება მუავე ცეცხლგამძლე მასალებზე. ამიტომ, ხშირად მლღობი შპატის ნაცვლად წიდის თხევადდენადობის გაზრდის მიზნით გამოიყენება ბოქსიტი. ბოქსიტი Al_2O_3 -ის დიდი რაოდენობით შემცველობის გამო ზრდის ფუძე წიდის თხევადდენადობას. ბოქსიტი აჩქარებს მაღალფუძიანი წიდის ყორმირებას და ამით ხელს უწყობს რაფინირების პროცესების განვითარებას. ბოქსიტში SiO_2 -ის შემცველობა არ უნდა აღემატებოდეს 3-4 %. Al_2O_3 -ის რაოდენობა მერყეობს 20-60 % ფარგლებში, რკინის ჟანგის - 15-40 % ფარგლებში.

ბოქსიტისა და მლღობი შპატის ნაცვლად ზოგ შემთხვევაში გამოიყენება შამოტის აგურის ნამტკრევეები და მეორადი ალუმინის წარმოების ნარჩენი წიდა, რომელიც ბოქსიტის მსგავსად დიდი რაოდენობით შეიცავს Al_2O_3 -ს.

4.1.6. კარბიურიზატორები

ფოლადსადნობ ქარხნებში თხევადი თუჯის უქონლობისა და მყარი თუჯის დეფიციტისას, კაზმში თუჯის ჩასანაცვლებლად იყენებენ ნახშირბადშემცველ მასალებს ე.წ. კარბიურიზატორებს. სახელდობრ – ქვანახშირს, ანტრაციტს, კოქსს. ნავთობის კოქსს. გრაფიტის ელექტროდების ნამტვრევეებს და სხვა.

ამ მასალებით ხდება დანაკლისი ნახშირბადის კომპენსირება ნორმალურად რომ წარიმართოს დუღილის პროცესი და მივიღოთ სათანადო ხარისხის ფოლადი. ასეთი პროცესისათვის დამახასიათებელია კაზმის ძნელდნობადობა, რაც იწვევს დნობის პროცესის საგრძნობ გახანგრძლივებას და ღუმელის წარმადობის შემცირებას. კარბიურიზატორი უნდა იყოს ნაჭროვანი, აქროლადი ნივთიერებების მცირე შემცველობით. ასევე მცირე უნდა იყოს ისეთი მავნე მინარევეები, როგორცაა ნაცარი, გოგირდი და სხვა. ყველაზე კარგ კარბიურიზატორად ითვლება გრაფიტის ელექტროდების ნამტვრევეები. ეს მასალა გამოირჩევა მექანიკური სიმტკიცითა და მავნე მინარევეების მინიმალური რაოდენობით.

4.1.7. სათბობი

მეტალურგიაში გამოყენებული ტექნიკური სათბობი უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მოთხოვნილებებს:

1. წვის პროდუქტების აირისებრი (აირადი), მდგომარეობა და მათი უვნებლობა ადამიანების, ცხოველური და მცენარეული სამყაროსათვის.

2. საწვავი ნივთიერების საკმარისი მარაგი, რაც უზრუნველყოფს მისი გამოყენების ეკონომიკურ მიზანშეწონილობას.

3. წვის პროცესის მართვის შესაძლებლობა.

სათბობის ყველა სახესხვაობა ორგანული წარმოშობისაა და შედგება მათთვის დამახასიათებელი ელემენტებისაგან: ნახშირბადის, წყალბადის, ჟანგბადის, აზოტისა და გოგირდისაგან. სათბობის ძირითადი საწვავი ელემენტებია: ნახშირბადი და წყალბადი, რომლებიც, საწვავში სხვადასხვა შენაერთების სახით იმყოფებიან. აზოტი სათბობის ორგანული ნაწილის ბალასტია და მთლიანად გადადის წვის პროდუქტებში. ჟანგბადი სათბობში ბმული სახით იმყოფება და ამიტომ ამცირებს სითბოს გამოიმყოფი ელემენტების (C, H) ეფექტურობას. გოგირდის დაწვის შედეგად გამოიყოფა

სითბოს მნიშვნელოვანი რაოდენობა, მაგრამ იგი მაინც მინარევად ითვლება. გოგირდის დიდი ნაწილი გადადის ლითონში და საგრძნობლად აუარესებს მის მექანიკურ და ტექნოლოგიურ თვისებებს.

სათბობის ძირითადი კლასიფიკაცია წარმოებს მისი წარმოშობისა და აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით. წარმოშობის მიხედვით განარჩევენ ბუნებრივ და ხელოვნურ სათბობს, რომელიც აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით იყოფა მყარ, თხევად და აირისებრ (აირად) ჯგუფებად. სათბობის ზოგადი კლასიფიკაცია მოცემულია 4.1 ცხრილში.

ცხრილი 4.1

სათბობი მასალების კლასიფიკაცია

სათბობის აგრეგატული მდგომარეობა	სათბობის წარმოშობა	
	ბუნებრივი სათბობი	ხელოვნური სათბობი
მყარი	შეშა, ტორფი, მურა ნახშირი, ქვანახშირი, ანტრაციტი, საწვავი, ფიქლები	ხის ნახშირი, კოქსი, ნახშირის მტვერი
თხევადი	ნავთობი	ბენზინი, ნავთი, მა'ხუთი, სპირტი, ქვანახშირის ფისი
აირისებრი (აირადი)	ბუნებრივი აირი	კოქსის, ბრძმედის, სანათი, გენერატორული, წყალბადის აირები

სათბობის დაწვის შედეგად გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა დიდადაა დამოკიდებული მის ქიმიურ შედგენილობაზე.

სათბობის ქიმიურ ანალიზს აკეთებენ როგორც ქიმიური ელემენტების (C, H, O, N, S), ისე ქიმიური ნაერთების (CO, CO₂, CH₄ და სხვა) შემცველობის განსაზღვრის მიზნით.

ანალიზით, გარდა ძირითადი ელემენტებისა, განსაზღვრავენ ნაცრის (A) და ტენის (W) პროცენტულ შემცველობას სათბობში. ელემენტების შემცველობის დადგენა საჭიროა სათბობის წვის პროცესის გამოთვლა-შესწავლისათვის. სათბობის ელემენტარული ანალიზის შესაბამისად მასში განასხეავენ ორგანულ, საწვავ,

ცხრილი 4.2

სათბობის ელემენტარული შედგენილობა

სტანდარტული ინდექსები	ელემენტები						
	C	H	O	N	S	A	W
O	ორგანული მასა						
Γ	საწვავი მასა						
C	მშრალი მასა						
P	მუშა მასა						

მშრალ და მუშა მასებს. სათბობის ელემენტარული შედგენილობა გამოისახება 4.2 ცხრილით.

სათბობის ორგანული მასის მიხედვით მსჯელობენ მის გეარობაზე. საწვავი მასის მიხედვით კი – სათბობის დაწვის პროცესის შესახებ.

წვის სითბოს მიხედვით არჩევენ დაბალ, საშუალო და მაღალკალორიულ სათბობებს. დაბალკალორიულ სათბობებს მიეკუთვნება მურა ნახშირები, ტორფი, (თბოუნარიანობა 6,3–25,1 მჯ/კგ); ბრძმედის, კოქსის და გენერატორული აირები (თბოუნარიანობა 3,9–20,0 მჯ/მ³); საშუალო კალორიულობისაა კოქსი, ანთრაციტი (თბოუნარიანობა 29,3–33,5 მჯ/კგ); მაღალკალორიულია მაზუთი (39,8–41,9 მჯ/კგ) და ბუნებრივი აირი (35,6–39,6 მჯ/მ³).

4.1.8. ცეცხლგამძლე მასალები

ცეცხლგამძლე მასალების კლასიფიკაციას აწარმოებენ რამდენიმე ნიშნის მიხედვით.

ცეცხლგამძლეობის მიხედვით განარჩევენ ცეცხლგამძლე მასალების სამ ჯგუფს:

1. ცეცხლგამძლე მასალების პირველი ჯგუფი, რომელშიც შედის მასალები 1580–1770 °C ცეცხლგამძლეობის ტემპერატურით;

2. მაღალი ცეცხლგამძლეობის მასალები, რომელთა ცეცხლგამძლეობა შეადგენს 1770–2000 °C;

3. უმაღლესი ცეცხლგამძლეობის მასალები, რომელთა ცეცხლგამძლეობის ტემპერატურა 2000 °C მეტია.

ქიმიურ-მინერალოგიური შედგენილობის მიხედვით ცნობილია ცეცხლგამძლე მასალების შემდეგი სახესხვაობები:

1. კაუშიწოვანი (SiO_2) – მათ მიეკუთვნება დინასის (მუავე) მასალები;

2. ალუმოსილიკატური (Al_2O_3 და SiO_2) – ნახევრად მუავე, შამოტის და მაღალთიხამიწოვანი მასალები;

3. მაგნეზიალური (MgO) – მაგნეზიტი, დოლომიტის (MgO , CaO), ფორსტერიტის, ტალკის და შპინელის მასალები;

4. ქრომოვანი (Cr_2O_3) – ქრომომაგნეზიტის და მაგნეზიტ-ქრომიტული (MgO , Cr_2O_3) მასალები;

5. ცირკონული (ZrO_2 და SiO_2) მასალები;

6. ნახშირბადოვანი (C) – თიხაგრაფიტული ან თიხაგრაფიტოვანი მასალები;

7. კარბიდული (mC) - კარბორუნდის (SiC) და სხვა მასალები;

8. სუფთა ჟანგეულები – კორუნდის (Al_2O_3), ცირკონის (ZrO_2), პერიკლაზის (MgO), კალციუმის (CaO), ბერილიუმის (BeO) და სხვ. მასალები.

ცეცხლგამძლე მასალებს აჯგუფებენ აგრეთვე ფორმის სირთულისა და ზომების მიხედვით:

1. მარტივი ფორმის მასალები (ჩვეულებრივი პარალელეპიპედის ფორმის აგური, სხვადასხვა ზომის ოთხკუთხა ბლოკები);
2. ფასონური მასალები;
3. სპეციალური დანიშნულების რთული ფორმის მასალები.

ცეცხლგამძლე მასალებს განარჩევენ მათი ფიზიკური თვისებებით: ფორიანობით, აირშელწვეადობით, სითბოგამტარობით, სითბოტევადობით, ელექტროგამტარობით და თერმული გაფართობობით. მათ მუშა თვისებებს მიეკუთვნება: ცეცხლგამძლეობა, დატვირთვის ქვეშ დეფორმაციისადმი წინააღმდეგობა, მაღალი ტემპერატურის პირობებში თერმომედეგობა, წიდამდგრადობა და მოცულობის ცვალებადობა მეორადი გამოწვევის დროს.

თ ა ვ ი II

ფოლადის წარმოება მარტენის პროცესით

4.2.1. მარტენის პროცესის აღმოცენება და განვითარება

მე-19 საუკუნის დასაწყისში დაიწყო მანქანათმშენებლობის სწრაფი განვითარება, რასაც მოჰყვა მაღალი ხარისხის ფოლადის დიდი რაოდენობით წარმოების აუცილებლობა.

იმ დროისათვის არსებული ფოლადის წარმოების გუნდური და პუდლინგის ხერხები, შემდგომში კი – ბესემერისა და თომასის პროცესები ვერ უზრუნველყოფდნენ სხვადასხვა თვისებების მქონე ხარისხოვანი ფოლადის დიდი რაოდენობით გამოშვებას.

მეორე მხრივ, ლითონდამამუშავებელი მრეწველობის ძლიერ განვითარებამ გამოიწვია დიდი რაოდენობით ფოლადის ჯართის დაგროვება, რომლის გამოყენების საშუალება ძველი ტიპის კონვერტერებში მეტად შეზღუდული იყო.

ყოველივე ამან გამოიწვია ისეთი ხერხის შემუშავების საჭიროება, რომლითაც ნებისმიერი შედგენილობის თუჯიდან შესაძლებელი გახდებოდა ფოლადის მიღება.

ამ ამოცანის გადაწყვეტა შეიძლებოდა ამრეკლი ღუმელის ქველზე ჯართისა და თუჯის დნობით.

1840—1865 წლებში ემილ და პიერ მარტენები ატარებენ ცდებს ამრეკლ ღუმელში მყარი ჯართისაგან თხევადი ფოლადის მისაღებად. დიდი ხნის განმავლობაში მათი ცდები უშედეგო იყო, რადგანაც გამოყენებულ ამრეკლ ღუმელებში მათ ვერ მიიღეს ფოლადის გამოდნობისათვის საკმარისი ტემპერატურა.

1856 წ. ძმებმა სიმენსებმა წამოაყენეს წინადადება სპეციალურ კამერებში — რეგენერატორებში ჰაერის გასახურებლად გამოყენებული ყოფილიყო სადნობი ღუმელის ნამწვი აირების სითბო.

პიერ მარტენმა სიმენსების ეს პრინციპი გამოიყენა როგორც ჰაერის, ასევე საწვავი აირის გასახურებლად და ამით უზრუნველყო ამრეკლ ღუმელებში ფოლადის დნობისთვის საჭირო ტემპერატურის მიღება.

ცნობილია, რომ წვის თეორიული ტემპერატურა დამოკიდებულია ჰაერის და აირის მიერ შეტანილ ფიზიკურ სითბოზე:

$$t = \frac{Q_d + Q_{\text{წ}}}{\sum V \cdot C_p},$$

სადაც Q_d — აირის (სათბობის) თბოუნარიანობა, ჯ/მ³;

$Q_{\text{წ}}$ — ჰაერის და აირის ფიზიკური სითბო, ჯ/მ³;

$\sum V \cdot C_p$ — წვის პროდუქტების მოცულობისა და მათი საშუალო თბოტევადობის ნამრავლთა ჯამი, ჯ/მ³.

ჰაერისა და საწვავი აირის გახურების შედეგად იზრდება $Q_{\text{წ}}$ და აქედან გამომდინარე, იზრდება წვის ტემპერატურა (1).

პიერ მარტენის დამსახურება ისაა, რომ პირველმა მან გამოიყენა სითბოს რეგენერაციის პრინციპი თხევადი ფოლადის მისაღებად და შეიმუშავა დნობის ტექნოლოგიის საფუძვლები. 1864 წელს მარტენმა ააგო რეგენერატორებიანი ამრეკლი ღუმელი. ცეცხლგამძლე მასალად გამოიყენა დინასი. ქვედი დადუღებული იყო კვარცის ქვიშით. შემუშავებული ტექნოლოგიური პროცესი წარმოადგენდა ჯართ-პროცესს და ემყარებოდა საკაშმე მასალების (თუჯის, ჯართისა და მდნობის) ზუსტ თანაფარდობათა დაცვას.

ამ პროცესმა შემდგომში გავრცელება პოვა ფოლადის მწარმოებელ ყველა ქვეყანაში და მათ შორის — რუსეთშიც. 1870 წელს სორმოვოს ქარხანაში აიგო 2,5 ტ მარტენის ღუმელი და ჩატარდა პირველი დნობა.

თავდაპირველად მარტენის ღუმელებს აგებდნენ მუავე მასა-
ლით და ისინი მუშაობდნენ მუავე პროცესით. 1878 წლიდან (თომასის პროცესის აღმოცენების შემდეგ) მარტენის ღუმელის ამოსა-
გებად დაიწყო ფუძე ცეცხლგამძლე მასალების გამოყენება და
შემუშავებული იქნა ფუძე მარტენის პროცესი, რომლის მეშვეობი-
თაც შესაძლებელი შეიქმნა შედარებით ბევრი გოგირდისა და
ფოსფორის შემცველი თუჯის გადამუშავება და მისგან ფოლადის
მიღება.

მე-19 საუკუნის ბოლოს და მე-20 საუკუნის 20-იან წლებამდე
მარტენის ღუმელების ტევადობა არ აღემატებოდა 15-40 ტ. ცეცხლ-
გამძლე მასალების ხარისხის გაუმჯობესებამ და მეტალურგიაში
მრავალმა სხვადასხვა ტექნიკურმა მიღწევამ განაპირობა მარტენის
ღუმელების კონსტრუქციის სრულყოფა, ტევადობის ზრდა 200-400,
600 და 900 ტონამდე. გაჩნდა დნობის ინტენსიფიკაციისათვის
სუფთა ჟანგბადის გამოყენების შესაძლებლობა. წარმოიქმნა მარტე-
ნის ღუმელში ფოლადის დნობის პროცესის სახესხვაობები: ჯარ-
თული, კარბიურატორული და ჯართ-მადნური. მე-20 საუკუნის
60-ან წლებამდე მსოფლიოში გამოდნობილი ფოლადის 70 %
იწარმოებოდა მარტენის ღუმელებში. შემდგომში განვითარება
პოვა ჟანგბად-კონვერტერებმა და მძლავრმა ელექტროფოლად-
სადნობმა ღუმელებმა, რის შედეგადაც მარტენის ღუმელებში
ფოლადის გამოდნობა მკვეთრად შემცირდა. დღეისათვის მარტე-
ნის ღუმელები ძირითადად შემორჩენილია ყოფილი საბჭოთა
კავშირის ქვეყნებში, ჩინეთსა და ინდოეთში.

4.2.2. მარტენის ღუმელის კონსტრუქცია და მუშაობის პრინციპი

არსებობს მარტენის ღუმელის ორი ტიპი – სტაციონარული და მერხვეი. მერხვეი ღუმელები, სტაციონარულისაგან განსხვა-
ებით, ჩასმულია მტკიცე ლითონურ კარკასში და სპეციალური
მექანიზმებით ხდება მათი დახრა (წრიული მოძრაობა) როგორც
წინ, ასევე უკან.

მერხვეი ღუმელების მშენებლობა სტაციონარულზე ბევრად
უფრო ძვირია. ამის გარდა, ღუმელის წრიული მოძრაობა აფერხებს
პერმეტულობის დაცვას, ადგილი აქვს ცივი ჰაერის შეწოვას და
საწვავი აირის საგრძნობ გადახარჯვას. აღნიშნულის გამო, მერხვე
ღუმელებს იყენებენ იმ იშვიათ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა
მაღალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავება, რისთვისაც

აუცილებელი ხდება პირველადი წიდის დიდი რაოდენობით მოხდა და განახლება.

დღეისათვის არსებულ მარტენის საამქროებში ძირითად მოქმედებაშია სტაციონარული ტიპის 185, 220, 370, 500, 600 და 900 ტ ლუმელები. თანამედროვე მარტენის ლუმელი წარმოადგენს როჟლ ტექნიკურ ნაგებობას ალტურვილს ავტომატური და ნახევრად ავტომატური მექანიზმებით, სითბოს საუტილიზაციო ქვაბებით (რომლებშიც გამოიყენება გამავეალი აირების სითბო), ლუმელის თბური რეჟიმის მარეგულირებელი აპარატურით და სხვა.

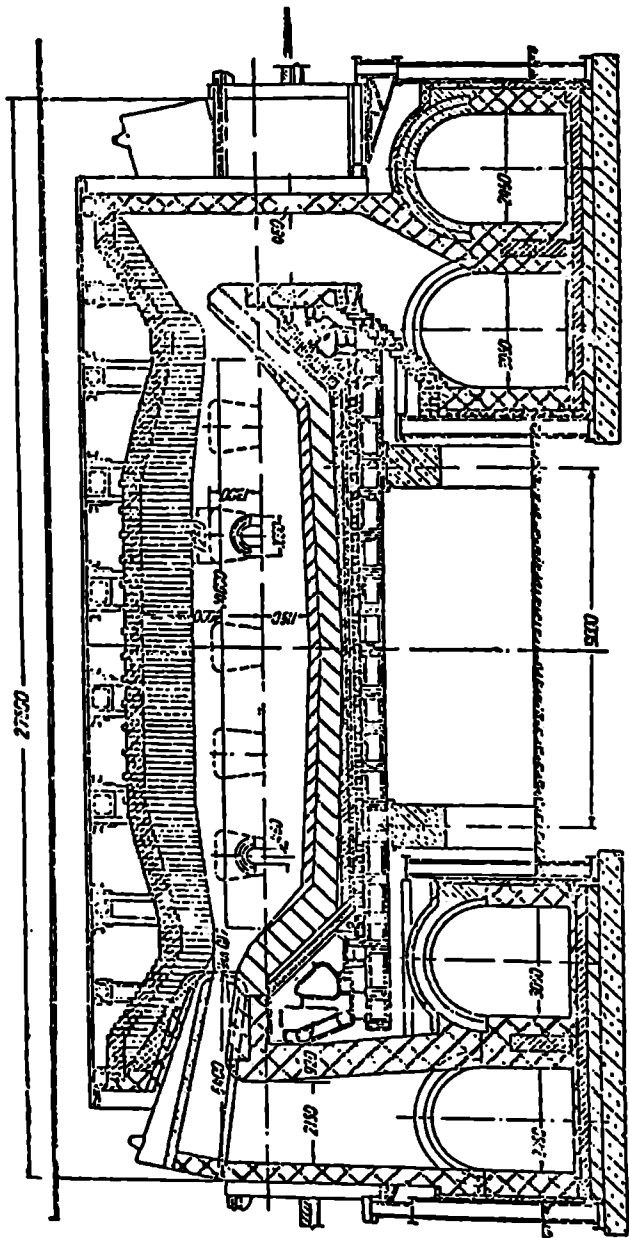
4.1 და 4.2 სურათზე წარმოდგენილია თანამედროვე 370 ტ მარტენის ლუმელის გრძივი (1) და განივი (2) კეითები.

ლუმელი შეიძლება დაეყოთ ზედა და ქვედა ნაგებობად. ზედა ნაგებობა (სურ. 4.1) მოთავსებულია სამუშაო მოედნის ზემოთ. სამუშაო მოედანი იმყოფება საამქროს იატაკიდან 5-7 მეტრის სიმაღლეზე. ლუმელის ზედა ნაგებობაში შედის სამუშაო ანუ სადნობი სივრცე (წინა და უკანა კედელი) და თაურები საპაერო და საწვაეი აირის ვერტიკალური არხებით (თუ საწვაეად აირია გამოყენებული), როდესაც საწვაეად მაზუთს ან ბუნებრივ აირს იყენებენ, მაშინ აირისათვის განკუთვნილ თაურებს და ვერტიკალურ არხებს აღარ ითვალისწინებენ. ლუმელის ქვედა ნაგებობაში, რომელიც იმყოფება სამუშაო მოედნის ქვეშ, შედის საწიღურები, რეგენერატორული კამერები წყობურით და ალიბჭეები გადამრთველი მოწყობილობებით (საპაერო და საჭიროების შემთხვევაში - სააირე სარქველებით).

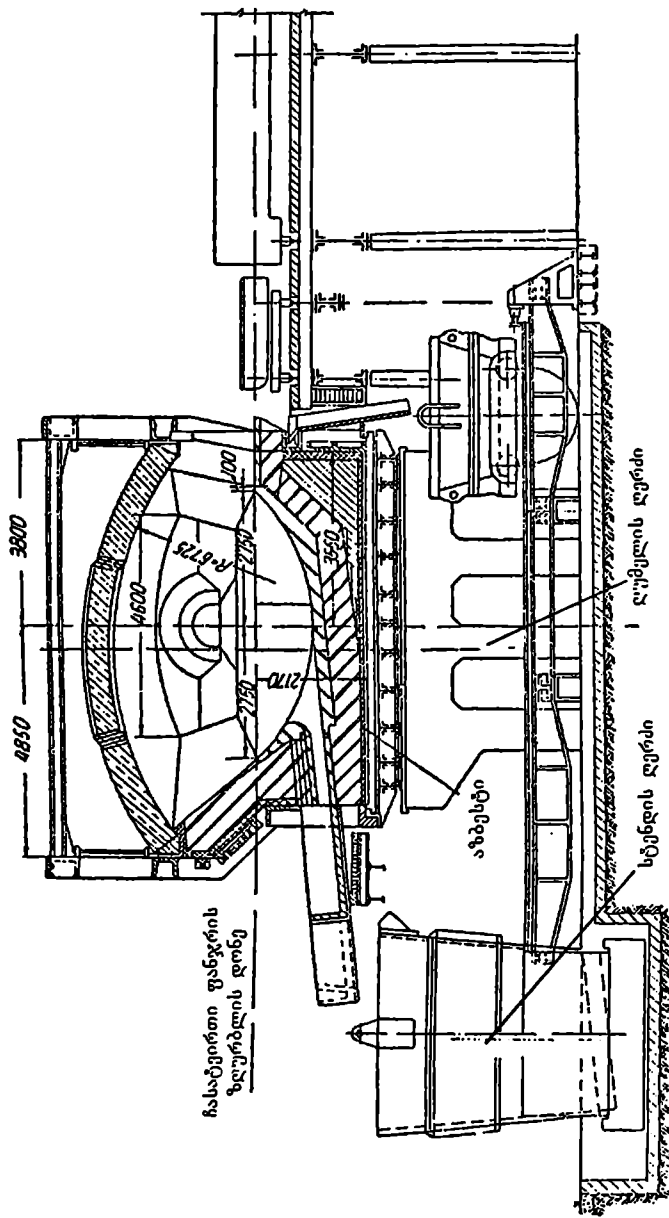
სამუშაო სივრცე შემოფარგლულია წინა და უკანა კედლებით. თალით, ქვედითა და ტორსული მხრიდან თაურებით. ლითონი დნება სამუშაო სივრცის ქვედზე. წინა კედელს აქვს მუშა ფარჯრები, საიდანაც ხდება კაზმის ჩატვირთვა, დნობის პროცესზე ეიზუალური დაკვირვება, წიდისა და ლითონის სინჯების აღება. საფლუსე (მდნობი), მალეგირებელი და განმჟანგეელი მასალების დამატება და სხვა. უკანა კედლებში ქვედის დონეზე ყველაზე დაბალ წერტილში არის ფოლადის გამოსაშეები ხერელი ფოლადის მიმღები ღარით, საიდანაც დნობის დამთაერების შემდეგ თხევადი ლითონი ჩაედინება ციცხეში (სურ. 4.2).

სათბობის წვა ხდება სამუშაო სივრცეში, ამიტომ ლუმელის ამ ნაწილში ყველაზე მაღალი ტემპერატურაა (სამუშალოდ 1800 °C). ლუმელიდან გამავეალ აირებს აქვს 1650-1700 °C ტემპერატურა. ხოლო თვით თალის ტემპერატურა იცვლება 1680-1750 °C ფარგლებში.

თაურების დანიშნულებაა პაერისა და აირის მიწოდება ლუმელში, ლუმელიდან ნამწვი პროდუქტების გაყვანა და ჩირაღდანისათვის გარკეეული მიმართულების მიცემა.



სურ. 4.1. 370 ტ-ნი მარტენის ღუმელის გრძივი კვეთი



სურ. 4.2. 370 ტ-ნი მარტენის ლუმელის კანივი კვეთი

მარტენის ლუმელის მუშაობისათვის დამახასიათებელია პაერისა და სათბობის მიწოდების და კვამლის ნაკადის მიმართულების პერიოდული ცვლა. ამასთან დაკავშირებით, ერთი თაური მისი მიმართველია, მეორე კი – მიმღები. მათი მუშაობის ხასიათი იცვლება სათბობის და პაერის მიწოდების მიმართულების ცვლასთან ერთად. ლუმელის თაურები ვერტიკალური არხებითაა დაკავშირებული სააირე და საჰაერო საწიდურებთან. საჭიროების შემთხვევაში ემიჯნებიან რა რეგენერატორებს საწიდურები ღებულობენ დნობის პროდუქტებით გაჯერებულ ბოლს და იცავენ რეგენერატორებს წყობურებს გადაგლესისაგან.

რეგენერატორების წყობურქვეშა სივრცე დაკავშირებულია საჰაერო საკვამლე და სააირე-საკვამლე ალიბჭეებთან. უკანასკნელნი კი უერთდებიან საკვამლე მილს.

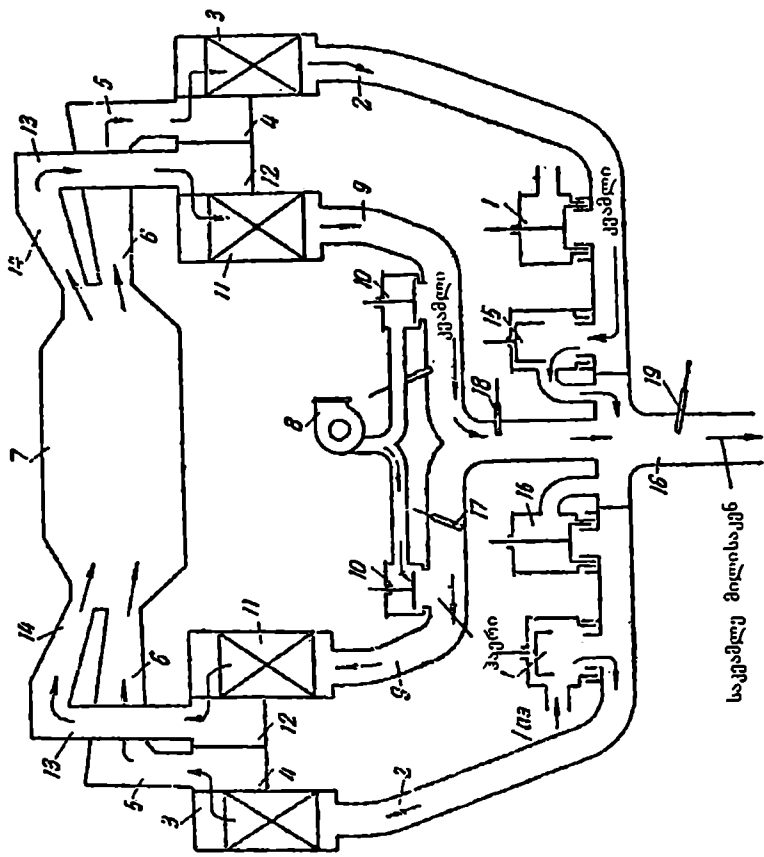
ალიბჭეებში დაყენებულია გადამრთველი მოწყობილობა, კვამლისა და პაერის შობერები და სარქველები, რომელთა დანიშნულებაა აირების, პაერის და წვის პროდუქტების მიწოდების მიმართულების პერიოდული ცვლა.

საწიდურების დანიშნულებაა წვის და დნობის პროდუქტებით გაჯერებული კვამლის ნაკადის სინქარის ეარდნით მოაცილოს მას დიდი რაოდენობით მყარი ნაწილაკები და რეგენერატორის წყობური დაიცვას მტერისა და ჭვარტლისაგან, რომ მისი მუშაობის პერიოდი – კომპანია რამდენჯერმე გაიზარდოს.

მარტენის ლუმელის მუშაობის სქემა შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად (სურ. 4.3). თუ აირი და პაერი შემოდის სამუშაო სივრცეში მარცხენა მხრიდან, მაშინ აირი პიდრაველიკური სარქელის მეშვეობით (1) გაივლის სააირე ალიბჭეში (2), საიდანაც გადავა რეგენერატორების (3) წყობურქვეშა სივრცეში, გაედინება წყობურებში; წყობური იქ ხურდება 1200–1300 °C-მდე, მერე კი საწიდურების (4) გავლით, ვერტიკალური არხით (5) შედის მარცხენა თაურში (6). ცივი პაერი (8) პაერმბერის და სარქელის (10) მეშვეობით შემოდის საჰაერო ალიბჭეში (9), გადადის რეგენერატორებში (11), ხურდება 1200–1300 °C-მდე და საწიდურების (12) და ვერტიკალური არხის (13) მეშვეობით შედის მარცხენა თაურში (14).

სააირე (6) და საჰაერო (14) თაურებიდან გამოსული აირ-პაერის ნარევი ააღდება და წარმოქმნილი ჩირაღდანი მოეფინება სამუშაო სივრცეს.

აირის წვის შედეგად ჩირაღდნის ტემპერატურა აღწევს 1800–1900 °C. წვის პროდუქტები 1650–1700 °C ტემპერატურით შედის მარჯვენა თაურში, სადაც ნაწილდება სააირე და საჰაერო



სურ. 4.3. თანამედროვე მარტენის ლემელის სექმატური გამოსახულება მთლიანობაში

ვერტიკალურ არხებში იმის და მიხედვით. თუ რამხელა განივი კვეთით აქვთ მათ და როგორი გაიწვიათებაა იქ. საკვამლე აირები ვერტიკალური არხებით (5.13) შედის საწიღურებში (4.12), შემდეგ კი - რეგენერატორებში (3.11). საწიღურში წვის პროდუქტები კარგაგის მოძრაობის სინქარეს მისი მიმართულების შეცვლისა და გაფართოების შედეგად, რაც უზრუნველყოფს დნობის მტკვრის მსხვილი ფრაქციების დაღექვას და რეგენერატორების წყობურების დაცვას გაჭვარტვლისაგან.

ნამწვი აირები რეგენერატორებში შედის 1500-1550 °C ტემპერატურით, გაივლის წყობურებს, ახურებს 1200-1300 °C-მდე და ალიბჭეების (2,9) მეშეობით მიემართება საკვამლე მილისაკენ (16). 5-15 წუთის შემდეგ, მარჯვენა რეგენერატორების გახურებიდან გადამრთველი სარქველების საშუალებით ცვლიან სათბობის, ჰაერისა და კვამლის მიმართულებას. ახლა უკვე სათბობი აირი და ჰაერი შემოდის მარჯვენა მხრიდან, ხოლო ნამწვი აირი კვამლის სახით გადის ღუმელის მარცხენა მხრიდან, გაივლის ყველა საფეხურს ეტაპობრივად, ახურებს გაცივებულ რეგენერატორებს და 500-600 °C-მდე გაცივებული შედის ალიბჭეში, იქიდან კი - ქაბუტილიზატორის გავლით - საკვამლე მილში. დროის შუალედი, რომელშიც ხდება სარქველების გადართვა, შეესაბამება მარჯვენა ან მარცხენა რეგენერატორების წყობურების ზედა ნაწილის მაქსიმალურ ტემპერატურამდე გახურებას და ეს იმპულსია გამოიყენებული მარტენის ღუმელის ავტომატური რეჟიმით მუშაობისათვის.

თუ ღუმელის გახურება ხდება მაღალკალორიული სათბობით (ბუნებრივი აირი ან მაზუთი), მაშინ საწვაი გახურების გარეშე პირდაპირ მიეწოდება თაურებში სპეციალური ფრქვევანას მეშეობით. ღუმელის კონსტრუქცია მარტივდება, რადგან გახურებას ექვემდებარება მხოლოდ ჰაერი. თანამედროვე მარტენის ღუმელებში დნობის პროცესის ინტენსიფიკაციისა და მისი ხანგრძლივობის შემცირებისათვის მიმართავენ ჰაერის გამდიდრებას სუფთა ჟანგბადით, რომელიც მიეწოდება თაურებში სპეციალური ფრქვევანების მეშეობით ან კიდევ ღუმელის უკან, კედელში სპეციალურად გაკეთებულ ხვრელში მოთავსებული მოძრავი ფრქვევანას საშუალებით. ტექნიკურ ჟანგბადს იყენებენ აგრეთვე აბაზანის გაქრვისათვის მინარეების პირდაპირი დაჟანგვის მიზნით.

4.2.3. მარტენის პროცესის ზოგადი დახასიათება

მარტენის პროცესის განხორციელებისას ხდება ღუმელის ქვედზე ჩატვირთული კაზმის დნობა, გამდნარი ლითონური აბაზანის გახურება სათანადო ტემპერატურამდე ($1600-1640^{\circ}\text{C}$), მისი ქიმიური შედგენილობის საჭირო კონდიციამდე მიყვანა და შემდგომ გამოშვება. მთელი დნობა შეიძლება დაეყოს შემდეგ პერიოდებად:

1) ღუმელის გაწყობა, რომელიც მოიცავს ცარიელი ღუმელის ვიზუალურ დათვალიერებას, შენიშნული დეფექტების დაფიქსირებას (ქვედზე არსებული ღრმულები, წინა და უკანა დამრეკე კედლებზე (ფერდოვებზე) არსებული დეფექტები, თაღის დეფექტები) და მათ ლიკვიდაციას (ამოვსებას გამომწვარი დოლომიტის ან მაგნეზიტის ფხენილით);

2) საკაზმე მასალების ჩატვირთვა, რომელიც ხორციელდება ღუმელის წინა კედელში მოთავსებულ სამუშაო ფანჯრებიდან სპეციალური როფებით;

3) გადნობა;

4) დუღილი ანუ დაყვანა;

5) განუანგვა და ლეგირება.

ღუმელის სადნობ სივრცეში სათბობის სრულად დაწვის მიზნით, ჰაერის მიწოდება ხდება თეორიულად საჭიროსთან შედარებით ჭარბი რაოდენობით. ჰაერის ჭარბი ჟანგბადი და წვის პროდუქტებში CO_2 -სა და H_2O -ს არსებობა, რომლებიც მაღალ ტემპერატურაზე განიცდის დისოციაციას, უზრუნველყოფს ღუმელში დამუანგველი ატმოსფერის არსებობას. ჯერ კიდევ ჩატვირთვისა და გადნობის პერიოდებში ხდება ღუმელის დამუანგველი ატმოსფეროს მოქმედება. იწყება რკინისა და კაზმის სხვადასხვა ელემენტების დაჟანგვა. დაჟანგვის პროდუქტები, ფლუსთან (მდნობთან) და ცეცხლგამძლე ამონაგის ნაწილაკებთან ერთად წარმოქმნის წიდას, რომელიც კაზმის გადნობის დამთავრების მომენტისათვის მთლიანად ფარავს თხევად ლითონს.

წიდას წარმოქმნა და ჩამოყალიბება ძალიან დიდ გავლენას ახდენს იმ პროცესებზე, რომლებიც მიმდინარეობს მარტენის ღუმელში აიროვან, თხევად და მყარ ფაზებს შორის და რომლებიც განაპირობებენ ფოლადის საბოლოო ხარისხს.

წიდა შედგება ფუძე, მჟავა და ამფოტერული ჟანგეულებისა და სულფიდებისაგან – CaS , MnS , FeS . ფუძე ჟანგეულებს განეკუთვნება CaO , MgO , MnO , FeO ; მჟავა ჟანგეულებს – SiO_2 , P_2O_5 , TiO_2 , V_2O_5 , და სხვა. ამფოტერულს – Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , და სხვა. როგორც ცნობილია, ეს ჟანგეულები ურთიერთქმედების შედეგად

წარმოქმნის რთულ ნაერთებს – სილიკატებს (CaSiO_3 , FeSiO_3), ფოსფატებს ($(\text{CaO})_2\text{P}_2\text{O}_5$; $(\text{FeO})_3\text{P}_2\text{O}_5$), შპინელებს ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) და სხვა.

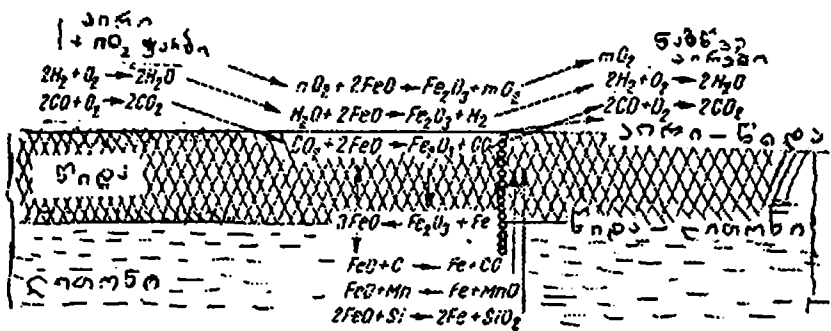
ფუძე მარტენის წიდაში აუცილებლად არის ფუძე ჟანგეულები – CaO , MnO , FeO თავისუფალი სახით, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჟანგბადის გადასვლას წიდიდან ლითონში. ხოლო ლითონიდან – ფოსფორის, გოგირდის და სხვა მინარეების გადასვლას წიდაში. მჟავე წიდების ძირითადი კომპონენტია SiO_2 . ფუძე ჟანგეულები, უპირველეს ყოვლისა, CaO და MgO ზრდის წიდის დნობის ტემპერატურას. მჟავე, ჟანგეულები კი პირიქით – ამცირებს. მჟავე წიდაში SiO_2 ზრდის წიდის ლღობის ტემპერატას. ყველა ჟანგეულები კი ამცირებს.

აბაზანის ზედაპირის წიდით დაფარვის შემდეგ მინარეების უშუალო დაჟანგვა ღუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადით პრაქტიკულად აღარ ხდება. ამის შემდეგ, ჟანგბადი თხევად ლითონში შემოდის წიდის საშუალებით, რომელშიც ღუმელის ატმოსფეროსთან შეხების ზედაპირზე რკინის ქვეჟანგი იჟანგება Fe_3O_4 და Fe_2O_3 ჟანგეულებამდე, ხოლო ეს უკანასკნელი კი წიდის ზემო ფენიდან დიფუზიით გადაინაცვლებს წიდის ქვემო ფენებში და კვლავ გარდაიქმნება რკინის ქვეჟანგად. შემდგომში რკინის ქვეჟანგი უერთდება ლითონის მინარეებს აიროვანი (CO) და მყარი (SiO_2 , MnO) ჟანგეულების წარმოქმნით. რომლებიც ლითონიდან გადადის წიდაში, იქიდან კი აიროვანი CO გადადის ღუმელის ატმოსფეროში.

ღუმელის ატმოსფეროში ჟანგბადის პარციალური წნევა 10^2 ატ-ზე ნაკლები არასოდეს არ არის, ხოლო თხევად რკინასთან წონასწორობის მდგომარეობაში ყოფნისას ჟანგბადის პარციალური წნევა არ აღემატება 10^0 ატმ. ამრიგად, აირად და ლითონურ ფაზათა შორის ჟანგბადის პოტენციალის დიდი სხვაობის გამო, ყოველთვის აქვს ადგილი აირადი ფაზიდან ლითონისაკენ ჟანგბადის უწყვეტ მიწოდებას.

4.4 სურათზე ნაჩვენებია მარტენის ღუმელის აირადი ატმოსფეროდან წიდის გავლით ლითონში ჟანგბადის გადასვლის სქემა.

როგორც სურათიდან ჩანს, სათბობი აირის კომპონენტები უერთდება პაერის ჟანგბადს და წარმოიქმნება ჟანგეულები (H_2O , CO_2), რომლებიც წიდის ზედაპირზე შედიან რეაქციაში რკინის ქვეჟანგთან რკინის ჟანგის მიღებით. ეს უკანასკნელი წიდის და ლითონის შეხების ზედაპირზე რეაქციაში შედის რკინასთან რკინის ქვეჟანგის წარმოქმნით. მისი მეშვეობით ხდება თხევადი ლითონის მინარეების დაჟანგვა და წარმოქმნილი პროდუქტების

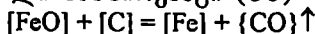


სურ. 4.4. ღუმელის ატმოსფეროდან წიდის გაკლით ლითონში ჟანგბადის გადასვლის სქემა

წიდაში - (MnO , SiO_2) და ღუმელის ატმოსფეროში (CO) გადასვლა. რკინის ქვეჟანგის ნაწილი კი ადის წიდის ზედა ფენაში და კვლავ იჟანგება Fe_2O_3 -მდე, როგორც სურათიდან ჩანს. საწვავი აირი შეიცავს ჭარბ ჟანგბადს, რომელიც უზრუნველყოფს აირების სრულ წვას ღუმელის სამუშაო სივრცეში. ლითონში მინარევების დაჟანგვის დაჩქარების მიზნით, კაშში სპეციალურად შეჰყავთ რკინის მადანი, რომლის ჟანგეულები (Fe_3O_4 , Fe_2O_3) წარმოადგენს ჟანგბადის დამატებით წყაროს. ზოგჯერ ახდენენ გაქრევას ტექნიკური ჟანგბადით ან კომპრესორული ჰაერით.

გადნობის შემდეგ ღულილის პერიოდში მინარევების ამოწვასთან ერთად ხდება ლითონის გახურება ჩამოსხმისათვის საჭირო ტემპერატურამდე, რომელიც დაახლოებით $100^\circ C$ -ით აღემატება რკინის დნობის* ტემპერატურას.

მარტენის ღუმელის, როგორც სითბური აგრეგატის თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ ლითონს სითბო გადაეცემა ზემოდან, წიდის საშუალებით. ეს აძნელებს ლითონის გახურებას. ეს პროცესი საგრძნობლად დაჩქარდება ლითონის აბაზანის აქტიური არევით, რასაც უზრუნველყოფს ნახშირბადის დაჟანგვის შედეგად წარმოქმნილი ნახშირჟანგი (CO)



მისი ბუშტულები ადის აბაზანის ზედაპირზე, ურევს ლითონს და წიდას და ამით აჩქარებს სითბოს გადაცემის პროცესს აიროვანი ატმოსფეროდან წიდაში, წიდიდან კი - ლითონში. რაც უფრო ინტენსიურია ნახშირბადის ამოწვა, მით უფრო სწრაფად

* ფოლადი, რკინისაგან განსხვავებით, დნება ტემპერატურულ ინტერვალში და არა ერთ რომელიმე ტემპერატურაზე.

იზრდება ლითონის ტემპერატურა. ამიტომ, გახურებისათვის საჭირო პირობების შესაქმნელად დუღილის პერიოდში ლითონი უნდა შეიცავდეს ნახშირბადის მეტ რაოდენობას, ვიდრე საჭიროა მზა ფოლადში. ამისათვის კაზმს ანგარიშობენ იმ ვარაუდით, რომ გაღნობის მომენტში ლითონში იყოს 0.3–0.8 %-ით მეტი ნახშირბადი, ვიდრე ეს გათვალისწინებულია გამოსადნობი ფოლადის მარკის ქვედა ზღვრით.

დაყვანის პერიოდის დასაწყისში ნახშირბადის ამოწვის დასაჩქარებლად აბაზანაში დამატებით შეაქვთ რკინის მადანი. დუღილის პერიოდში ერთდროულად მიმდინარეობს ლითონიდან ნახშირბადის ამოწვა, გოგირდისა და ფოსფორის მოცილება (დეფოსფორაცია, დესულფურაცია), აირების მოშორება, არაღიოთნური ნაწილაკების ატანა წიდაში და რაც მთავარია, აბაზანის გახურება.

როდესაც ლითონი მიაღწევს სასურველ ქიმიურ შედგენილობას ნახშირბადის, გოგირდისა და ფოსფორის შემცველობის თვალსაზრისით და სათანადო ტემპერატურას, ხდება მისი ნაწილობრივი განუხანგვა-ლეგირება მალეგირებელი ელემენტების ნაწილის შეტანით აბაზანაში. მცირეოდენი დაყოვნების შემდეგ, ლითონს უშვებენ ციცხვში, სადაც ხდება მისი საბოლოო ლეგირება და განუხანგვა.

4.2.4. მარტენის პროცესის სახესხვაობები

ცნობილია მარტენის ღუმელებში ფოლადის დნობის მუავე და ფუძე პროცესები. მუავე პროცესის დროს დნობა მიმდინარეობს მუავე ცეცხლგამძლე მასალით ამოგებულ ღუმელში, ხოლო ფუძე პროცესისა კი – ფუძე ცეცხლგამძლე მასალით ამოგებულ ღუმელში. მუავე ცეცხლგამძლე მასალების ძირითადი შემადგენელია SiO_2 და მათ მიეკუთვნება დინასის აგური, კვარცის ქვიშა და კვარციტი. ფუძე ცეცხლგამძლე მასალები ძირითადად შეიცავს MgO -ს ან $\text{MgO}+\text{CaO}$ -ს: მაგნეზიტის აგური, გამომწვარი მაგნეზიტის ფხვნილი და დოლომიტი.

მარტენის ღუმელში შეიძლება გადამუშავდეს ფოლადის ჯართისა და თუჯისაგან შემდგარი კაზმი, რომელშიც მათი ფარდობა იცვლება 100 % ჯართიდან 100 % თუჯამდე. გამოდნობის ტექნოლოგია დამოკიდებულია საკაზმე მასალების თანაფარდობაზე, რადგან იგი ახდენს გაელენას მინარევებისა და ჟანგვისათვის საჭირო ჟანგბადის რაოდენობაზე და იმ პროცესებზე, რომლებიც

განაპირობებენ წილის წარმოქმნას და ლითონის დუღილს ღუ-
მელში.

კაზმის შედგენილობის მიხედვით ცნობილია ფუძე მარტენის
პროცესის შემდეგი ვარიანტები: ჯართული, კარბიურატორული
და ჯართ-მადნური.

ჯართ-პროცესი. ამ შემთხვევაში კაზმის ლითონური ნაწილი
შედგება 55—75 % ფოლადის ჯართისა და 25—45 % მყარი თუჯი-
საგან. ფოლადის ჯართი, რომელიც საკაზმე ეზოდან მიეწოდება
მარტენის ღუმელის სამუშაო მოედანზე რკინიგზის შემადგენ-
ლობაზე მოთავსებული როფებით, არის საკუთარი (თვით
ქარხანაში წარმოებული ლითონის ნარჩენები) და გარედან
შესყიდული. საკუთრივ ქარხნის ჯართში იგულისხმება თვით
მარტენის საამქროში წარმოქმნილი წუნდებული ლითონი (საკენ-
ტრეებსა და სიფონურ არხებში დარჩენილი ლითონი და ასევე,
ჩამოსხმის შედეგად წარმოქმნილი სხვა ლითონური ნარჩენები)
და აგრეთვე სხვა საამქროებში ლითონის შემდგომი გადამუშავების
შედეგად წარმოქმნილი ჯართი. ჯართის ეს ნაწილი საწყობში
შენახვის სწორი ორგანიზაციის შემთხვევაში ზუსტად არის
დიფერენცირებული. ქიმიური შედგენილობის, გაბარიტებისა და
წონადობის მიხედვით. გარედან შექმნილი ჯართის ასეთი დიფერ-
ენცირება გაძნელებულია, რადგან ზუსტად არ არის ცნობილი
მისი წარმომავლობა და ქიმიური შედგენილობა. ჯართად გამო-
იყენება აგრეთვე ფურცლოვანი რკინა (თუნუქი, მსუბუქი მანქანების
ძარა, კონსერვის ქილები და სხვა) და მექანიკურ საამქროებში
დეტალების დამუშავების შედეგად წარმოქმნილი ბურბუშელა.
ასეთ ჯართს, დიდი გაბარიტების გამო, აუცილებლად ესაჭიროება
წნეხის ქვეშ დაპაკეტება. მიუხედავად დაპაკეტებისა, ასეთი ჯართის
მიწოდება ღუმელში მკაცრად რეგლამენტირებულია. რადგან იგი
მსუბუქია, დიდია მოცულობით, დიდხანს გრძელდება მისი
ჩატვირთვა და ადგილად იჟანგება ღუმელის ატმოსფეროში მყოფი
ჭარბი ჟანგბადით. ყოველივე ამის გამო, საგრძნობლად მცირდება
ღუმელის წარმადობა და ლითონის გამოსავალი. აღსანიშნავია,
რომ მაღალი ხარისხის ფოლადის გამოდნობისას ასეთი ჯართის
ჩატვირთვა ღუმელში არ არის მიზანშეწონილი.

ჯართ-პროცესის დროს დიდი ყურადღება ექცევა თუჯის,
როგორც კაზმის ნაწილის, ქიმიურ შედგენილობას და რაოდენობას.
ვინაიდან ფოლადის ჯართთან შედარებით თუჯი უფრო ადვილ-
დნობადია, რაც მეტია მისი რაოდენობა (წილი) კაზმში, მით
უფრო სწრაფად მიმდინარეობს ღუმელში დნობის პროცესი, მაგრამ
იზრდება ფოლადის თვითღირებულება. ამავდროს დიდ მნიშვნე-

ლობა აქვს თუჯში ნახშირბადის, სილიციუმისა და მანგანუმის შემცველობას.

კაზმის გადნობის მომენტში ლითონში ნახშირბადის რაოდენობა უნდა იყოს იმდენი, რამდენიც უზრუნველყოფს დაყვანის პერიოდში ლითონის ინტენსიურ დუღილს და სათანადო მარკის ფოლადის მიღებას. სილიციუმის რაოდენობა თუჯში დაახლოებით 1,0 %-ს შეადგენს. გადნობის პერიოდში სილიციუმი მთლიანად იჟანგება ლუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადით (აგრეთვე იმ ჟანგბადით, რომელიც შეიტანა დაჟანგულმა ჯართმა), იცავს ნახშირბადს ამოწვისაგან და ჟანგბადთან შეერთების რეაქციის ეგზოთერმულობის გამო, გამოყოფს სითბოს დიდ რაოდენობას. სილიციუმის 1,0 %-ზე მეტი შემცველობა თუჯში არ არის სასურველი. რადგან რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი SiO_2 ფუძე პროცესში ზრდის წილის რაოდენობას და ძლიერ ამცირებს მის ფუძიანობას. საჭირო ხდება კირქვის ხარჯის გაზრდა. რაც უფრო მეტად ზრდის წილის რაოდენობას და ახანგძლივებს დნობის პროცესს.

მანგანუმის შემცველობა თუჯში მერყეობს 1,0 %-ის ფარგლებში. თუჯის მანგანუმი ლითონის დნობის პირველ (გადნობის) პერიოდში იწვის და, ისევე როგორც სილიციუმი, გამოიყოფს სითბოს, ხოლო დაყვანის პერიოდში კი პირიქით წიდაში მყოფი MnO იწყებს აღდგენას ნახშირბადის მეშვეობით და გადადის ლითონში, რაც მეტყველებს ლითონისა და წილის საკმაოდ მაღალ (სასურველ) ტემპერატურაზე.

ფუძე ჯართ-პროცესის დროს კარგი პირობები იქმნება ლითონის დეფოსფორაციის და დესულფურაციისათვის, მაგრამ მიუხედავად ამისა, თუჯში ფოსფორის შემცველობა არ უნდა აღემატებოდეს 0,3 %-ს, ხოლო გოგირდისა – 0,05 %-ს. ფოსფორისა და გოგირდის გადაჭარბებული რაოდენობა ახანგძლივებს დნობას, საჭიროებს წილის დიდი რაოდენობით მოხდას, მის განახლებას, საფლუსე მასალების დიდ რაოდენობას ზრდის ლითონის დანაკარგს წიდაში, ამცირებს ლუმელის წარმადობას და ზრდის ფოლადის თვითღირებულებას.

კარბიურატორული ჯართ-პროცესი. იმ შემთხვევაში, როდესაც საწარმო თუჯის ნაკლებობას განიცდის ან საერთოდ არ აქვს, კაზმში თუჯის ნაცვლად შეაქვთ ნახშირბადშემცველი მასალები, ე.წ. კარბიურიზატორები – ქვანახშირი, ანტრაციტი, კოქსი, გრაფიტის ელექტროდების ნარჩენები და სხვა. ასეთი პროცესისათვის დამახასიათებელია კაზმის ძნელდნობადობა. გადნობის პროცესის გაჭიანურების თავიდან აცილებისა და დნობის პროცესის ნორმალურად წარმართვისათვის საჭიროა

კაზმის შემადგენელი ნაწილების ღუმელში ჩატვირთვის ოპტიმიზაცია ღუმელის თერმული შესაძლებლობების მაქსიმალური გამოყენებით. კარბიურატორული პროცესის დროს ღუმელის ქვედზე პირველ რიგში ტვირთავენ მსუბუქ ჯართს. ჯართის 15-20-წუთიანი გახურების შემდეგ ხდება კარბიურიზატორის მიწოდება კომპაქტური ნატრების სახით, ხოლო მას ზემოდან ეყრება დანარჩენი ჯართი და წიდა-წარმოქმნელი მასალები. სითბოს დანაკარგის შემცირების მიზნით, კირქვის ნაცვლად გამოიყენება ახლადგამომწვარი კირი. თუჯის სიმცირის ან მისი არ არსებობის გამო, მინარეები კაზმში იმდენად ცოცხაა, რომ მათი დაუანგვისათვის სავსებით საკმარისია ღუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადი. კარბიურიზატორში რაც შეიძლება ნაკლები უნდა იყოს მავნე მინარეები - გოგირდი და ფოსფორი, ხოლო თვით ნახშირბადი უნდა იყოს ნაკლებად აქროლადი და ლითონის მიერ კარგად ათვისებადი. დნობის ხანგრძლივობა ამ პროცესის დროს 1-2 საათით მეტია. ვიდრე სხვა ვარიანტების შემთხვევაში. ეს იწვევს ღუმელის ამონაგის ინტენსიურ ცვეთას და ღუმელის წარმადობის საგრძნობ შემცირებას.

ჯართ-მადნური პროცესი. ეს პროცესი გაერცელებულია იმ ქარხნებში, სადაც შემორჩენილია მარტენის ღუმელები და არის თხევადი თუჯი. კაზმის ლითონური ნაწილი შედგება 50-25 % ფოლადის ჯართისა და 50-75 % თხევადი თუჯისაგან. პროცესს მადნური ეწოდება იმიტომ, რომ კაზმი განსაზღვრული რაოდენობით შეიცავს რკინის მადანს. მისი შემადგენელი რკინის ჟანგეულები ჟანგბადის დამატებითი წყაროა თუჯში არსებული ნახშირბადისა და სხვა მინარეების ამოსაწვავად. კაზმში რკინის მადნის რაოდენობა განისაზღვრება თხევადი თუჯის რაოდენობით და მისი ქიმიური შედგენილობით. რაც მეტია კაზმში თუჯის პროცენტული შეცველობა, მით მეტი რაოდენობით შეაქვთ კაზმში მაღალხარისხოვანი ნატროვანი მადანი. როგორც წესი, მადნის რაოდენობა შეადგენს ღუმელში ჩატვირთული კაზმის წონის 10-15 %-ს და დამოკიდებულია კაზმში თუჯის რაოდენობაზე.

ამ პროცესის დროს კაზმის ჩატვირთვა ღუმელში მიმდინარეობს შემდეგი თანმიმდევრობით:

1) ღუმელის ქვედზე იყრება ჩასატვირთი მადნის ნახევარი ისე, რომ მთელი ქვედი თანაბრად დაიფაროს;

2) კირქვა;

3) დარჩენილი მადანი;

4) მსუბუქი ლითონური ჯართი;

5) მძიმე ლითონური ჯართი;

6) თხევადი თუჯი - ჩატვირთული კაზმის გახურების შემდეგ.

თუჯის ჩახხმის მომენტისათვის კაზში კარგად უნდა იყოს გახურებული. ეს ხელს უწყობს რკინის აქტიური ჟანგეულებით გაჯერებული წიდის დროულად წარმოქმნას. რაც აუცილებელი წინაპირობაა დეფოსფორაციისათვის. თუჯის ჩახხმიდან 5–30 წუთის შემდეგ იწყება ფოსფორიანი პირველადი წიდის მოხდა თვითდინებით. წიდა გადმოედინება როგორც უკანა კედელში მოთავსებული სპეციალური არხიდან, ასევე წინა სამუშაო ფანჯრიდან. ასეთი წიდის ფუძიანობა არ აღემატება 1.0–1.4-ს. პირველადი წიდის მოხდა ჯართ-მადნური პროცესის დროს აუცილებელია, რადგან ამ დროს თხევად თუჯში გახსნილი ფოსფორის დიდი ნაწილი გადადის წიდაში. გარდა ამისა, ღუმელში დარჩენილი წიდის სიმცირე ხელს უწყობს ლითონის გახურებას. დნობის პროცესი მიმდინარეობს თუჯში გახსნილი მინარეგების (Si, Mn, C, P) იტენსიური ამოწვით, რასაც თან ახლავს ლითონის ტემპერატურის ზრდა, კირქვის დაშლა და დუღილის პროცესის დაჩქარება. ამ პერიოდს ეწოდება „კირქეული“ დუღილი. კირქვის დაშლით გამოყოფილი ნახშირორჟანგი (CO_2), რომელიც ბუმბულების სახით ამოდის ქვემოდან ზემოთ შადრევეანისებრი მხეყების სახით, ახდეს ლითონისა და წიდის არევის და ხელს უწყობს ლითონის გახურებას აბაზანის მთელ მოცულობაში. ამავდროულად კირქვის დაშლა ზრდის წიდის ფუძიანობას. გადნობის მომენტისათვის ეს უკანასკნელი უკვე აღწევს 2–2.2 ერთეულს. ამ დროისათვის წიდას აქვს დაახლოებით ასეთი შედგენილობა: 35–45 % CaO , 20–22 % SiO_2 , 10–15 % FeO , 13–17 % MnO , 5–7 % MgO , 3–5 % Al_2O_3 , 2–4 % P_2O_5 . ამ დროისათვის ლითონში სილიციუმი პრაქტიკულად მთლიანად ამომწვარია, მანგანუმი 0.05–0.09 %-ია დარჩენილი, ასევე P – 0.04–0.06 %-ა და S – 0.045–0.06 %. ნახშირბადის შემცველობა ლითონში გადნობის მომენტში უნდა იყოს 0.3–0.8 %-ით მეტი მზა ფოლადის მარკის ქვედა ზღვართან შედარებით.

რეჟიმის სწორი წარმართვის შემთხვევაში (თხევადენადობა, ფუძიანობა, ჰომოგენურობა) გადნობის მომენტიდანვე იწყება დნობის პოლირება (დახალასება), რაც გამოიხატება ღუმელში რკინის მადნის ახალი ულუფის შეტანით, რომელიც აჩქარებს ნახშირბადის ამოწვას; შეაქვთ აგრეთვე ახლად გამომწვარი კირი და ბოქსიტი. კირის შეტანით იზრდება წიდის ფუძიანობა და ის აღწევს 2,5–3,0 ერთეულს. ასეთი წიდის ჩამოყალიბება ხელს უწყობს ლითონიდან ფოსფორისა და გოგირდის მოცილებას.

პოლირების დამთავრების შემდეგ იწყება ე.წ. სუფთა დუღილი, რომელიც გრძელდება 30–50 წუთს. სუფთა დუღილის დროს დაუმ-

ეპელის რკინის მადნის, კირის ან სხვა დანამატის შეტანა აბაზანაში. ნახშირბადის ამოწევა ამ დროს ხდება ღუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადის მეშვეობით და იმ ჟანგბადის ხარჯზე, რომელიც წიდაშია დარჩენილი პოლირების დროიდან.

სუფთა დუღილის დროს წიდის სედაპირი დაფარულია ლითონიდან ამომავალი ნახშირჟანგის მადღარა ბუმბულებით, რომელიც კმნის სითხის წყნარად დუღილის მთაბეჭდილებას. ამ პერიოდში იზრდება ლითონის ტემპერატურა; ადგილი აქვს მანგანუმის აღდგენას – გადასვლას წიდიდან ლითონში; იზრდება ლითონის განგოგირდების ხარისხი; ნახშირბადის შემცველობა უახლოვდება დაკეთილი მარკის ყოლადისათვის საჭირო რაოდენობას; ხდება ლითონის ტემპერატურული და ქიმიური შედგენილობის გათანაბრება აბაზანის მთელ მოცულობაში; აირებისა და არალითონური ჩანარების მოშორება; ფაქტობრივად, ამ დროს ლითონსა და წიდას შორის მყარდება დინამიკური წონასწორობა, რაც მიგვანიშნებს იმაზე, რომ დნობის პროცესი უკვე დამთავრებულია და შეიძლება ჩატარდეს ბოლო პროცედურა – განჟანგვა და ლევირება. ამ შემთხვევაში განმჟანგველად, როგორც წესი იყენებენ დაბალპროცენტიან ფეროსილიციუმს (18 % Si), თუ დანიშნული მარკის ფოლადი არ მოითხოვს მალევირებელი ელემენტების დიდი რაოდენობით შეტანას. მაშინ ლევირება და საბოლოო განჟანგვა მიმდინარეობს უკვე ციციხეში ლითონის გამომშვების დროს.

4.2.5. მარტენის პროცესის ტექნოლოგიური და სითბური რეჟიმების სინქრონიზაცია

მარტენის ღუმელის წარმადობის გაზრდისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება დნობის ტექნოლოგიური პროცესისა და სითბური რეჟიმის სინქრონიზაციის საკითხს. რაც უფრო დიდია ღუმელის სითბური დატვირთვა, მით უფრო სწრაფად მიმდინარეობს ქიმიური პროცესები, მცირდება დნობის ხანგრძლივობა და იზრდება წარმადობა, მაგრად, ამავე დროს, მაღალმა ტემპერატურამ შეიძლება გამოიწვიოს თადის გადახურება და მწყობრიდან მისი ნაადრევი გამოსვლა, რაც, ფაქტობრივად ნიშნავს ღუმელის წარმადობის შემცირებას. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა ენიჭება თბური რეჟიმის გადანაწილებას ტექნოლოგიური პროცესის სხვადასხვა პერიოდში. დნობის პირველ ეტაპზე, როდესაც ხდება ღუმელში კაზმის ჩატვირთვა და გახურება, თბური დატვირ-

თვა უნდა იყოს მაღალი, რადგანამ დროს ცივი ჯართი მაქსიმალურად ითვისებს სითბოს. კაზმის გადნობის შემდეგ, როდესაც ლითონი იფარება თხევადი წიდით, ლითონის მიერ სითბოს შთანთქმა მცირდება, ამიტომ, ამ დროს ღუმელის სითბურ დატვირთვას ამცირებენ. პოლირების დროს, როდესაც ღუმელში შეგვიქვს დამატებითი მასალები (კირი, რკინის მადანი, ბოქსიტი და სხვა), ასევე საჭიროა სითბური დატვირთვის გაზრდა. ასევე საჭიროა მაღალი თბური დატვირთვა დნობის ბოლო პერიოდში – სუფთა ღულილის, ლეგირებისა და განუარგვის დროს. როდესაც აქცილტრულია ლითონის გამოშვების წინ სათანადო ტემპერატურის მიღწევა.

თბური რეჟიმის რეგულირება დნობის პერიოდების მიხედვით. შესაძლებელია საწვავი აირის ხარჯის ცვლილებით (მოკლება-მომატებით დროს ერთეულში) და ჟანგბადით მისი წვის ინტენსიფიკაციით.

ჟანგბადის გამოყენება წარმოადგენს მარტენის ღუმელის წარმადობის გაზრდის ეფექტურ საშუალებას. დღეისათვის ფართოდაა გავრცელებული ჟანგბადის გამოყენების შემდეგი ხერხები:

1) ჟანგბადის მიწოდება სამუშაო სივრცეში (ჩირაღდანში) სათბობის წვის ინტენსიფიკაციისათვის;

2) თხევადი ლითონის აბაზანის გაქრევა ჟანგბადით ლითონის მინარევების უშუალო დაჟანგვის მიზნით;

3) ჟანგბადის კომბინირებული გამოყენება.

ჟანგბადის გამოყენება სათბობის წვის ინტენსიფიკაციისთვის, მაღალკალორიული სათბობის გამოყენების შემთხვევაში (ბუნებრივი აირი, მახუთი) ჟანგბადი შეჰყავთ ყრქვევიანას საშუალებით. წვის ზონაში ჟანგბადის შეყვანის შედეგად ხდება ჰაერის გამდიდრება ჟანგბადით. ჰაერის ჟანგბადით გამდიდრების ხარისხის მაჩვენებელი გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$X = \frac{0,21 \cdot y \cdot B + ZK}{y \cdot B + K}$$

სადაც X - ჰაერის გამდიდრების ხარისხი ანუ ჟანგბადის საშუალო კონცენტრაცია ნარევეში, %;

y - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ჰაერის კარგვას ტრაქტში და ტოლია 0,75;

B - დროის ერთეულში ღუმელში შეყვანილი ჰაერის რაოდენობა, მ³/სთ;

Z - ჟანგბადის კონცენტრაცია ტექნიკურ ჟანგბადში და ტოლია 0,96;

K - დროის ერთეულში მიწოდებული ჟანგბადის მოცულობა, მ³/სთ.

ჟანგბადით ჰაერის გამდიდრების შედეგად მცირდება წვის პროდუქტების რაოდენობა (ნაკლებია N_2). ეს იწვევს ჩირაღდნის თეორიული ტემპერატურის ამაღლებისა და გამოიხივებით სითბოს გადაცემის გაუმჯობესებას. წვის პროდუქტების რაოდენობის შემცირების გამო მცირდება სითბოს დანაკარგები, რომელიც გამაფალ აირებს გააქვთ ხოლმე და იზრდება ღუმელში სითბოს გამოყენება. ყველაფერი ეს კი იწვევს ღუმელის წარმადობის ზრდას და სათბობის კუთრი ხარჯის შემცირებას.

გარდა ამისა, ჰაერის გამდიდრება ჟანგბადით ხელს უწყობს აბაზანიდან გამოყოფილი ნახშირჟანგის (CO) ნახშირორჟანგად (CO_2) დაწვისას გამოყოფილი სითბოს გამოყენებას. ეს, ფაქტობრივად, წარმოადგენს სითბოს დამატებით წყაროს, რომელიც ემატება სათბობის წვის შედეგად გამოყოფილ სითბოს. ნახშირჟანგის წვის შედეგად გამოყოფილი სითბო თანაბრადაა განაწილებული აბაზანის ზედაპირზე და მას აბაზანა უკეთ ითვისებს. გარდა ამისა, იქნება საშუალება დაიზოგოს სათბობი და უკეთესი პირობები შეექმნას ღუმელის ცეცხლგამძლე ამონაგს მისი მდგრადობის გაზრდის თვალსაზრისით. ჟანგბადის გამოყენების შედეგად ღუმელის წარმადობა იზრდება საშუალოდ 20 %-ით. პირობითი სათბობის ხარჯი მცირდება 15–18 %-ით, ხოლო ჟანგბადის ხარჯი შეადგენს 24–35 მ³/ტ.

ჟანგბადის გამოყენება მინარევეების უშუალო დაჟანგვისას:
ფეის. ამ შემთხვევაში ჟანგბადი თხევად აბაზანაში შეჰყავთ ან ქმინებით, რომლებიც ცივდება წყლით და მოძრაობს თაღში. ან რკინის მილებით ღუმელის უკანა კედლის მხრიდან. თხევადი ლითონის გაქრევა ჟანგბადით საგრძნობლად აჩქარებს დაჟანგვით პროცესებს, რის შედეგადაც გამოიყოფა სითბოს დიდი რაოდენობა. ჟანგბადის შეყვანის ზონაში ლოკალური ტემპერატურა უტოლდება 2500 °C-ს, ხდება ლითონის სწრაფი გახურება და საგრძნობლად იზრდება ღუმელის წარმადობა.

ამ შემთხვევაში გაქრევა იწყება გადნობის პერიოდის ადრეულ სტადიაზე, ღუმელში თუჯის ჩასხმის მომენტიდან. ღუმელის წარმადობის თვალსაზრისითაც გაქრევის ადრე დაწყება ხელსაყრელია, მაგრამ ნახშირბადის მაღალი შემცველობის ლითონის გაქრევას თან ახლავს დიდი რაოდენობით დნობის მტერის წარმოქმნა, რაც გამანადგურებლად მოქმედებს ღუმელის ამონაგზე. ეს მტვერი შეიცავს 90 %-მდე Fe_2O_3 და FeO -ს, რადგანაც იგი ძირითადად წარმოიქმნება აორთქლებული რკინის დაჟანგვის შედეგად. რკინის კარგვა მტერის სახით იწვევს თხევადი ლითონის გამოსავლის შემცირებას. რაც უფრო მაღალია ნახშირბადის რაოდენობა ლითონში, მით უფრო მეტი რაოდენობის მტვერი წარმოიქმნება.

ნახშირბადის კონცენტრაცია
ლითონში, %

0,8-0,76
0,62-0,52
0,44-0,27
0,29-0,26

მტვრის რაოდენობა
გამაველ აირებში, გ/მ³

26,6
17,6
15,5
10,4

ჩვეულებრივი დნობისას, ჟანგბადის გამოიყენების გარეშე, მტვრის რაოდენობა გამაველ აირებში მერყეობს 0,5-2,0 გ/მ³ ფარგლებში. როგორც წესი, ჟანგბადით გაქრევის დროს ამცირებენ სითბურ დატვირთვას, რადგანაც აბაზანიდან ხდება ნახშირბადის, Mn-ის, Si-ის და P-ის ენერგიული წვა, რაც იძლევა სითბოს დამატებით რაოდენობას.

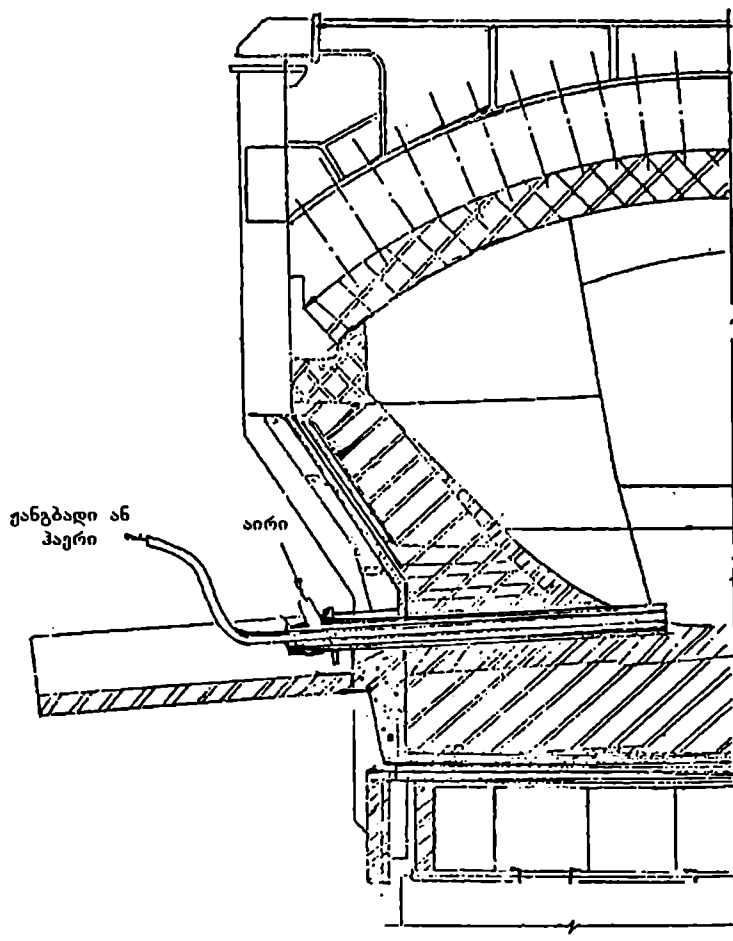
გაქრევის პერიოდში ლითონის გახურების სიჩქარე შეადგენს 70-100 °C/სთ. მაშინ, როდესაც ჩვეულებრივ დნობისას იგი არ აღემატება 40 °C/სთ. ჩვეულებრივ დნობებზე ნახშირბადის ამოწვის სიჩქარე შეადგენს 0,30-0,40 % C/სთ. ჟანგბადით გაქრევა ზრდის ამ სიჩქარეს და იგი ტოლია 0,60-0,70 % C/სთ.

ჟანგბადის კომბინირებული გამოყენება. გაქრევის დროს მტვრის დიდი რაოდენობით წარმოქმნის შემცირების მიზნით, ხელსაყრელია ჟანგბადის კომბინირებული გამოყენება. ასეთი მუშაობისას ჩირაღდანში ჟანგბადის შეყვანას იწყებენ ჩატვირთვის პერიოდში და წყვეტენ აბაზანის გაქრევის დაწყების წინ. კომბინირებული ხერხით მუშაობისას სახეზეა ორივე ხერხის უპირატესობანი.

მტვრის წარმოქმნის შესამცირებელად გამოიყენება ჟანგბადისა და წყლის ნაზავით გაქრევა. წყლის შეყვანა ლითონში ჟანგბადთან ერთად იწვევს ლითონის ტემპერატურის ლოკალურ შემცირებას და ამით მცირდება რკინის აორთქლება. დადგენილია, რომ წყლის და ჟანგბადის ნარევიტ გაქრევა ამცირებს მტვრის რაოდენობას გამაველ აირებში დაახლოებით 5-ჯერ. თუმცა ამ ხერხს აქვს თავის უარყოფითი მხარეც - იქმნება ლითონში გახსნილი წყალბადის რაოდენობის გაზრდის საშიშროება.

გასული საკუნის 80-იან წლებში რუსთავის მეტალურგიული კომბინატის მარტენის საამქროში გურამ ქაშიაკაშვილის მიერ, პირველად მსოფლიო პრაქტიკაში განხორციელდა აბაზანის გაქრევა ჟანგბადით, ბუნებრივი და ინერტული აირით ლუმელების გამოსაშვებ არხში ჩამონტაჟებული სპეციალური მოწყობილობის მეშვეობით (სურ. 4.5). მოწყობილობა შედგება ერთმანეთში კონცენტრულად ჩასმული ფოლადის ორი მილისაგან. შიგა მილით ლუმელში მიეწოდება ჟანგბადი, ხოლო გარეთა მილით - ბუნებრივი

აირი. ღუმელში კაზმის ჩატვირთვის პერიოდში ეს მოწყობილობა მუშაობს როგორც ფრქვევანა მაღალტემპერატურიანი (3500 °C) ჩირადნის წარმოქმნით. ამ ჩირადნით ხდება კაზმის გახურება ღუმელის ქვედის არეში, რაც საგძნობლად ამცირებს ჯართის გახურების ხანგრძლივობას და საშუალებას იძლევა თუჯი ჩაისხას ბევრად უფრო ადრე, ვიდრე ეს ხდება მარტენის ღუმელში ჩვეულებრივი დნობის დროს. თხევადი თუჯის ჩასხმის შემდეგ შესაბერი მოწყობილობის გარეთა მილში საწვავი ბუნებრივი აირის



სურ. 4.5. ჟანგბადით და ინერტული აირით გაქრევა ღუმელის გამოსაშვები ხერეულიდან

ნაცვლად მიეწოდება ინერტული აირი – არგონი. ჟანგბად-არგონის ნარევის მეშვეობით ხდება თუჯის მინარევეების ამოწვა, რაფინირების პროცესი მიდის სწრაფად, მნიშვნელოვნად მცირდება ღუმელში ლითონის გადნობისა და დაჟვანის პერიოდები.

მშვიდი (სუფთა) დუღილის დროს ჟანგბადის მიწოდება ან მთლიანად წყდება, ან დაყვანილია მინიმუმამდე. შებერილი ინერტული აირი ამ დროს ხელს უწყობს ლითონის ცირკულაციას. იქმნება ხელსაყრელი პირობები ლითონის გაწმენდისათვის მავნე აირებისა და მინარევეებისაგან. იზრდება შეხების ზედაპირი წიდასა და ლითონს შორის, ლითონის ქიმიური შედგენილობა და ტემპერატურა უფრო თანაბარი ხდება აბაზანის მთელ მოცულობაში. დნობის დამთავრების მომენტისათვის, როდესაც ღუმელში ჩასატარებელი ყველა პროცედურა შესრულებულია (განუანგვა, ლეგირება და სხვა) ინერტული აირის მიწოდება წყდება. მიღში შემავალი მცირე რაოდენობის ჟანგბადი კი ხელს უწყობს ჩამონტაჟებული მიღების სწრაფ დაწვას, გამოსაშვები არხი თავისუფლდება და იწყება ლითონის გამოშვება ღუმელიდან ციციხეში.

ღუმელში ლითონის დამუშავების შემთავაზებული მეთოდი საშუალებას იძლევა აირებთან ერთად აბაზანაში შევაფრქვიოთ ფხვნილოვანი რეაგენტები – კირი, ნახშირბადი (გრაფიტი). განმუხანგველები და სხვა მასალები, რომელთა მეშვეობითაც შესაძლებელია წიდა-ლითონში მიმდინარე პროცესების რეგულირება. მთავარი ღირსება ამ მეთოდისა ისაა, რომ საგრძნობლად იზრდება ღუმელის წარმადობა, რაც 40 %-ს აღემატება.

4.2.6. მჟავე მარტენის პროცესი

მჟავე მარტენის პროცესი ეწოდება ფოლადის გამოდნობის პროცესს მჟავეამონაგვიან მარტენის ღუმელში, ე.ი. ისეთ ღუმელში, სადაც ქვედი დამზადებულია მჟავე მასალებისაგან, დაახლოებით 95 % SiO_2 შემცველობით.

თავდაპირველად მარტენის ღუმელის ქვედს ამზადებდნენ მჟავე მასალებისაგან.

მჟავე მარტენის ღუმელებში დნობის პროცესი მიდის მჟავე წიდეების წარმოქმნით. ამის გამო, ამ პროცესის დროს შეუძლებელია მავნე მინარევეების – გოგირდის და ფოსფორის მოშორება. აქედან გამომდინარე, საკაზმე მასალები, რომლებიც გამოიყენებენ მჟავე მარტენის ღუმელებში სუფთა უნდა იყოს ფოსფორისა და გოგირდის მხრივ. სათბობი გოგირდს მცირე რაოდენობით უნდა

შეიცავდეს. მაგალითად, მაზუთში გოგირდი არ უნდა აღემატებოდეს 0,3–0,5 %-ს.

მჟავე პროცესში გამოიყენება ხის ნახშირზე ან კოქსზე გამომდნარი მაღალხარისხოვანი თუჯები დაახლოებით შემდეგი ქიმიური შედგენილობით (%):

C	Mn	Si	S	P
4,0	0,90	0,10	0,010	0,025

მჟავე ღუმელებში ქარხნის გარედან შემოტანილი ჯართი არ გამოიყენება, რადგანაც მისი შედგენილობა უცნობია. შეზღუდულია საკუთარი ჯართის გამოყენებაც.

საკაზმე მასალებად გამოიყენება ფუჟე მარტენის ღუმელებში გამოდნობილი ნამზადი. ეს ნახევარპროდუქტი შეიცავს 0,015–0,020 % S-სა და 0,010–0,020 % P-ს. საკაზმე ნამზადს იყენებენ მყარი ან თხევადი სახით.

თუჯისა და საკაზმე ნამზადის გარდა, იყენებენ აგრეთვე წიღის წარმომქმნელ და დამატებით მასალებს: რკინისა და მანგანუმის მადანს ან აგლომერატს, ადგილობრივი წარმოების მჟავე წიდას, შამოტის ნამსხვრევს, ქვიშას, კირს ან კირქვას. ეს მასალებიც სუფთა უნდა იყოს ფოსფორისა და გოგირდისაგან.

მჟავე ღუმელის ქვედი აქტიურ მონაწილეობას ღებულობს აბაზანაში მიმდინარე პროცესებში, ხოლო ფოლადის მაღალ ხარისხს დიდად განსაზღვრავს აბაზანასა და მჟავე ქვედს შორის მიმდინარე რეაქციები. ამიტომ, მჟავე ქვედის მდგომარეობას დიდი მნიშვნელობა აქვს.

მჟავე ღუმელის ქვედს ამზადებენ დადუღებით ან დატკეპნით. რუსეთში ქვედს ამზადებენ დადუღებით. ამისათვის გამოიყენება სუფთა მაღალსილიციუმიანი ქვიშები, დაფხვნილი კვარციტი ან კვარციტის და მჟავე წიღის ნარევი.

მჟავე ქვედი შეხებაშია ლითონთან ან წიდასთან. ორივე მათგანი შეიცავს გარკვეული რაოდენობის რკინის ჟანგეულებს. ამიტომ, მჟავე ქვედის ზედა ფენები განუწყვეტლივ მდიდრდება რკინის ჟანგეულებით და იცვლის ქიმიურ შედგენილობას, რის გამოც მცირდება მათი შემდგენელი მასალების დნობის ტემპერატურა. ერთ-ერთ ღუმელზე დაკვირვებამ გვიჩვენა, რომ ქვედის ქიმიური შედგენილობა იცვლება შემდეგნაირად (%):

	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃
ზედაპირი	66,8	20,82	8,87
40მმ სიღრმეზე	72,2	16,89	8,03
80 მმ სიღრმეზე	82,0	8,25	6,55

ქვედის შედგენილობის ასეთი ცვლილება გეავალდებულებს ყოველი 15–20 დნობის შემდეგ ჩავატაროთ გამაფრთხილებელი შეკეთება. გარდა ამისა, ყოველი დნობის შემდეგ, ქვედს ათვალთქვებენ და შეაკეთებენ. ამისათვის ღუმელის ქვედს, კედლებს და ფერდობებს კომპრესორული შეკუმშული ჰაერით გაასუფთაებენ ლითონისა და წილის ნარჩენებისაგან. შემდეგ კედლებს და ფერდობებს შეაკეთებენ ქვიშისა და კვარციტის ნარევით შეფარდებით 1:1, ხოლო ქვედს შეაკეთებენ სუფთა ქვიშით.

დნობის პროცესში ქიმიური შედგენილობის შეცვლის გარდა ქვედს უზრდება ნაპრალები, რაც გამოწვეულია კაჟშიწის მრავალჯერადი გადაკრისტალუბა-გადმოკრისტალუბით გახურება-გაცივებისას, რადგან 1470 °C ტემპერატურაზე ტრიდომიტი გარდაიქმნება კრისტობალიტად. ეს გარდაქმნა ნელა მიმდინარეობს. კრისტობალიტი გვხვდება მხოლოდ ქვედის ზედა ფენებში, სადაც ტემპერატურა საკმარისია, რომ გარდაქმნის პროცესი დაჩქარდეს. მიუხედავად ამისა, ქვედის ზედა ფენებში კრისტობალიტთან ერთად ტრიდომიტიც გვხვდება. ამრიგად, ქვედის ძირითადი მასა (ქვედა ფენებს გარდა) შედგება ტრიდომიტის კრისტალების ბადისაგან, რომელთა შუალედებიც შეესებულია რკინიანი წილებით. ქვედის სიმტკიცე დამოკიდებულია ტრიდომიტის ამ ბადის აგებულებასა და წილის დნობის ხარისხზე.

დნობის დამთავრების შემდეგ, თუ არ შევაკეთებთ ქვედს კვარციის ქვიშით ანდა მას შევიყვანთ არასაკმარისი რაოდენობით, მაშინ ქვედის ზედა ფენების დნობის ტემპერატურის შემცირების გამო მოხდება ქვედის „დამუშავება“. შედეგად ლითონი გაჭრის, (გაარღვევს) ქვედს და დაიფრება. ეს კი სერიოზული ავარიაა.

ხშირად შეიძლება ქვედს გარეგნულად არ ემჩნეოდეს დაზიანება, მაგრამ მის სიღრმეში წარმოიქმნას სიფხვიერე ან სიცარიელე. ამის თავიდან ასაცილებლად, ქვედს კვირაში ერთხელ ტკეპნიან. მეორე მხრივ, ქვედის განახლებისას კვარციის ქვიშა უნდა შეცხვეს ფოროვან მასად, რომელმაც უნდა შეიწოვოს წილის ნარჩენები ქვედის ზედა ფენიდან. ამასთანავე, ახლად დადუღებული ფენა იმავე შედგენილობისა უნდა იყოს, რაც ქვედის დანარჩენ ფენებს აქვს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, აბაზანის გადნობის შემდეგ ცუდად დადუღებული ქვედის ნაწილი ამოტივტივდება წიდაში, გაამდიდრებს მას ძნელდნობადი მასით, გააძნელებს დნობის ჩატარებას და შექმნის ქვედში ლითონის გაპარვის საშიშროებას.

ამის გამო, ქვედის შეკეთებას მუავე მარტენის ღუმელში დიდი ყურადღება ექცევა. იგი ძალზე შრომატევადი და ძნელი სამუშაოა. ყოველი დნობის შემდეგ ქვედის შეკეთებაზე იხარჯება 1–2 საათი.

4.2.7. კაზმის შედგენილობა, ჩატვირთვის რიგი და წილის წარმოქმნა

კაზმში თუჯის და ჯართის ან საკაზმე ნამზადის შედგენილობა დამოკიდებულია გამოსადნობი ფოლადის მარკაზე, პროცესის ტიპზე, საკაზმე მასალების შედგენილობასა და ღირებულებაზე. კაზმის შედგენის დროს ცდილობენ, რაც შეიძლება ნაკლები რაოდენობის თუჯი იყოს კაზმში. მყარ კაზმზე მუშაობისას ქვედზე ტვირთავენ თუჯს, ხოლო გადასაკეთებელ ნამზადის სხმულებს ტვირთავენ შემდეგ, რათა მათ არ დააზიანონ ქვედი. გარდა ამისა, ქვედზე ჯართის ჩატვირთვა საშიშია კიდევ იმიტომ, რომ ხენჯის გადნობის შედეგად წარმოქმნილი რკინიანი წილა გამოიწვევს ქვედის გაძლიერებულ ეროზიას. ქვედის დასაფარად იღებენ მთელი ტვეადობის 20 % თუჯს. საერთოდ კი, მყარი თუჯის რაოდენობა კაზმში შეადგენს 25–40 %-ს. ზოგ ქარხანაში გამოიყენება დუპლექს-პროცესი, რომლის დროსაც კაზმი შედგება მხოლოდ თხევადი ნამზადისაგან. კაზმს ადგენენ ისე, რომ გადნობისას ნახშირბადის რაოდენობა აღემატებოდეს მის საბოლოო შედგენილობას 0,5–0,75 %-ით. ნახშირბადის ასეთი ჭარბი რაოდენობა საკმარისია დუდილის ნორმალურად ჩასატარებლად და ხარისხოვანი ფოლადის მისაღებად. სილიციუმში კაზმში უნდა იყოს არაუმეტეს 0,5 %-სა. მაშინ, გადნობის მომენტისთვის სილიციუმის რაოდენობა ლითონში იქნება 0,05–0,08 % და ლითონი ადვილად წამოდულდება.

მჟავე ლუმელში წილის წარმოქმნისათვის არ არის ისეთი პირობები, როგორც ფუძე ლუმელში. ამიტომ ლითონი შეიძლება არ იყოს მთლიანად დაფარული წიდით. ეს კი გამოიწვევს ლითონის ინტენსიურ დაჟანგვას და მის გამდიდრებას აირებით. ამის თავიდან ასაცილებლად კაზმის ჩატვირთვამდე ლუმელში შეჰყავთ მჟავე წიდა ლითონის წონის 2–4 %-ის რაოდენობით. გარდა ამისა, დუპლექს-პროცესით მუშაობის დროს აბაზანის დუდილის დასაჩქარებლად ლუმელში შეჰყავთ ცოტაოდენი რკინის მადანი (ლითონის წონის 0,5 %). ამრიგად, გადნობის მომენტისათვის მჟავე მარტენის ლუმელში წარმოქმნილი წიდა შეიცავს ლუმელში ჩატვირთული მჟავე წიდის შამოტის კომპონენტების (Si, Mn და Fe) დაჟანგვის შედეგად წარმოქმნილ ჟანგეულებს და ამონაგის დაშლის პროდუქტებს. წიდაში გადასული ამონაგის რაოდენობა დამოკიდებულია ქვედის დადულების ხარისხზე, კაზმის შედგენილობასა და გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობაზე. როდესაც გადნობის პერიოდი გაჭიანურებულია, რკინის ჟანგი, დიდი რაოდენობით

წარმოიქმნება და მჟავე ქვედით აიწიდება. ნორმალური მუშაობის შემთხვევაში წილის რაოდენობა დამოკიდებულია კაზში მანგანუმის რაოდენობაზე. როცა მანგანუმის რაოდენობა დიდია, წარმოქმნილი MnO აიწიდება მჟავე ქვედით. წარმოქმნილი მანგანუმის სილიკატები გადადის წიდაში.

ამრიგად, მჟავე ქვედი არეგულირებს წილის შედგენილობას გადნობის მომენტისათვის. საშუალოდ შესაძლებელია მივიღოთ წილის შემდეგი შედგენილობა, (%):

FeO MnO SiO_2

15–20 20–30 42–47

გადნობის მომენტისათვის წარმოქმნილი წიდა ძირითადად შედგება რკინის ქვეანგის, მანგანუმის ქვეანგისა და კაჟმიწისაგან. FeO და MnO წარმოიქმნება რკინის და მანგანუმის დაჟანგვის შედეგად, ხოლო SiO_2 – როგორც კაზში მყოფი სილიციუმის დაჟანგვით, ასევე ამონაგის გახსნის შედეგად. კაზიდან მიღებული SiO_2 არ არის საკმარისი FeO-სა და MnO-ს შესაწიდავად. იგი ამის გამო გადადის წიდაში ამონაგიდან და დამატებითი მასალეზიდან. მყარ საკაზმე მასალეზზე მუშაობის დროს, როდესაც ღუმელში არ შეჰყავთ მჟავე წიდა, გადნობის მომენტისათვის წარმოქმნილი წილის 40–50 % შედგება ქვედიდან გადასული მასალეზისაგან. ჩატვირთვაში წილის გამოყენებისას ან ღუპლექსპროცესით მუშაობის დროს ეს სილიდე შეადგენს 10–20 %-ს.

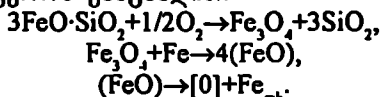
დანარჩენი კომპონენტები (CaO , MgO , Al_2O_3 და სხვა) გადნობის მომენტისათვის წარმოქმნილ წიდაში არ აღემატება 5–6 %-ს. რადგან წიდა დიდი ხნის განმავლობაში ეხება მჟავე ქვედს, იგი გაჯერებულია კაჟმიწით. 1550–1600 °C ტემპერატურის მქონე წიდაში, რომელიც წონასწორობაშია ამონაგის SiO_2 -თან, კაჟმიწის რაოდენობაა 46–49 %.

გადნობის მომენტისათვის მჟავე მარტენის წიდაშია 94–95 % SiO_2 , FeO და MnO. დანარჩენი 5–6 % მოდის CaO , MgO , Al_2O_3 და სხვა ჟანგეულებზე. რადგან SiO_2 -ის წონასწორული რაოდენობა წიდაში თითქმის მუდმივია და მცირედ იცვლება ტემპერატურის ცვლილებისას, ამიტომ, გადნობის მომენტისათვის წიდაში (FeO+MnO)-ის რაოდენობაც მუდმივია – დაახლოებით 45–49 %.

4.2.8. მინარევეების ჟანგვა-აღდგენის რეაქციები კაზმის გადნობის შემდეგ

მჟავე პროცესის წიდა განუწყვეტელ შეხებაშია ღუმელის მჟავე ქვედთან და კედლებთან; ამიტომ იგი მდიდრდება კაჟმიწით, რომლის რაოდენობაც დნობის დამთავრებისათვის აღწევს 55–60 %-ს. რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა ამ წიდაშია 7–12 %, მანგანუმის ქვეჟანგისა კი – 20–30 %. FeO-MnO-SiO_2 სისტემის წიდისათვის, როდესაც იგი შეიცავს 55 %-ზე მეტ SiO_2 , დნობის ტემპერატურა არ აღემატება 1600 °C-ს. ამის გამო, დნობის ბოლოსთვის წიდა ხდება ბლანტი და ჰეტეროგენული. ჭარბი კაჟმიწა წიდაში ჩანართების სახითაა, რაც განაპირობებს მინარევეების ჟანგვა-აღდგენითი პროცესების მიმდინარეობას და ხასიათს.

რადგან წიდა შეიცავს SiO_2 -ს ისეთი რაოდენობით, რომელიც უახლოვდება გაჯერების მდგომარეობას, ამიტომ მასში რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგები იმყოფება ბმულ მდგომარეობაში რკინის და მანგანუმის სილიკატების სახით. ასეთ შემთხვევაში ღუმელის ატმოსფეროდან აბაზანაში ჟანგბადის გადაცემა წიდის საშუალებით ხდება ან რკინის და მანგანუმის სილიკატების დაჟანგვის შედეგად ატმოსფეროს ჟანგბადით:

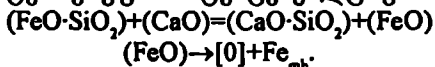


ან ღუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადით წიდაში მყოფი ლითონის იმ მარცვლების დაჟანგვის შედეგად, რომლებიც არევის წყალობით შეიტანს ჟანგბადს ლითონის აბაზანაში რკინის ჟანგულების სახით.

ამრიგად, მჟავე ღუმელშიც ისევე, როგორც ფუძე ღუმელში, მხოლოდ უფრო ნაკლები ინტენსიურობით, ხდება აბაზანის კევა ღუმელის ატმოსფეროს ჟანგბადით.

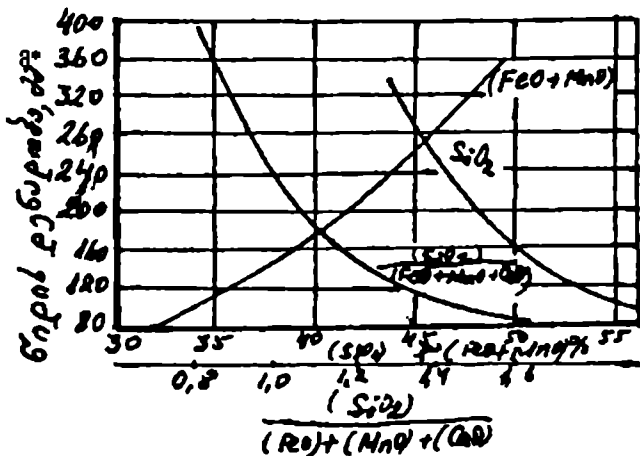
მჟავე ღუმელში მინარევეების დაჟანგვის ინტენსიფიკაცია შეიძლება აბაზანაში რკინის მადნის, მანგანუმის მადნის, კირის, წვრილად დამსხვრეული კირქვის ან ჟანგბადის შეყვანით.

ღუმელში კირის ან კირქვის შეყვანის შედეგად წარმოიქმნება რკინის სილიკატებზე უფრო მტკიცე კალციუმის სილიკატები



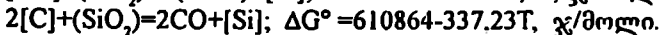
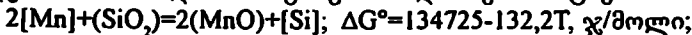
ამის შედეგად აბაზანა მიიღებს ჟანგბადს მინარევეების ჟანგვისათვის და ამავე დროს იზრდება წიდის კაჟმიწით გაჯერების ზღვარი; შეიძლება მივიღოთ, რომ თუ წიდა შეიცავს 5–6 % CaO , კაჟმიწის ხსნადობა იზრდება 53–54 %-მდე, ხოლო 10–15 %-მდე

კირის შემცველობისას კი - 57-58 %-მდე. ამრიგად, მუავე წიდაში კირის დამატების შედეგად ხდება მინარევეების დაჟანგვის რეაქციების ინტენსიფიკაცია. მაგრამ ეს მოვლენა ხანმოკლეა, რადგანაც ქვედის კაუმიწა იხსნება და წიდა კელაე ბლანტი ხდება. ამის გამო, მუავე წიდის შედგენილობის დასახასიათებლად მასში SiO_2 -ის კონცენტრაციის გარდა, საჭიროა გაითვალისწინოთ CaO -ის რაოდენობაც. წიდის შედგენილობის დასახასიათებლისათვის გამოიყენება სიდიდე - მუავეანობა, რომელიც წარმოადგენს ყარდობას $\text{SiO}_2/(\text{FeO}+\text{MnO}+\text{CaO})$. ქვემოთ მოყვანილია წიდის შედგენილობის გავლენა მის თხევად დენადობაზე (სურ. 4.6).



სურ. 4.6. მუავე წიდის შედგენილობის გავლენა მის თხევადდენადობაზე

მუავე ლუმელში, ლუმელის ატმოსფეროსა და რკინის მადნის გარდა, ჟანგბადის წყაროდ შესაძლებელია მოგვევლინოს თვით კაუმიწა. ნახშირბადისა და მანგანუმის დაჟანგვის დროს მუავე წიდა და ლითონი გაჯერებულია კაუმიწით. ეს კი ქმნის ხელსაყრელ პირობას, რათა მოხდეს სილიციუმის აღდგენა წიდისა და ქვედის კაუმიწიდან. სილიციუმის აღდგენა შესაძლებელია მოხდეს ნახშირბადით, მანგანუმითა და რკინითაც კი.



ამ რეაქციების წონასწორობის მუდმივაა

$$K_{\text{Si,Mn}} = \frac{(\text{MnO})^2 \cdot [\text{Si}]}{[\text{Mn}]^2}$$

$$K_{Si,C} = \frac{[Si]}{[C]^2}$$

მოყვანილი მუდმივების ტემპერატურული დამოკიდებულება განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\lg K_{Si,Mn} = -\frac{7036}{T} + 6,9,$$

$$\lg K_{Si,C} = -\frac{31900}{T} + 17,61.$$

მოყვანილი დამოკიდებულებების განხილვა გვიჩვენებს, რომ ტემპერატურის მატებისას იზრდება მუდმივების მნიშვნელობაც, ე.ი. მაღალ ტემპერატურებზე იქმნება ხელსაყრელი პირობა სილიციუმის აღდგენისათვის. იგივე დასკვნასთან მივალთ, თუ განვიხილავთ სისტემის თავისუფალი ენერჯიის ცვლილების მნიშვნელობას.

ამრიგად, მჟავე პროცესის დროს ადგილი აქვს სილიციუმის აღდგენას კაჟმიწიდან მანგანუმითა და ნახშირბადით. ა. ტიჟროვი თვლიდა, რომ სილიციუმის აღდგენა რკინასაც შეუძლია:



სწორედ ამ რეაქციის განვითარებით შეიძლება აიხსნას წიდაში რკინის ქვეჟანგის ზრდასთან ერთად ლითონში სილიციუმის რაოდენობის ზრდა. ამ აზრის წინააღმდეგ გამოდის კრამაროვი, რომელმაც ზემოთ მოყვანილი რეაქციისთვის მიიღო.

$$\lg K_{Si} = -\frac{18136}{T} + 10,61.$$

როდესაც $T = 1620^\circ C$, მაშინ $K_{Si} = (FeO)^2 \cdot [Si] = 10,6$. თუ მჟავე წიდა შეიცავს 18,5 % FeO, მაშინ მასთან წონასწორობაში მყოფ ლითონში იქნება 0,03 % Si. თუ ლითონი შეიცავს 0,03 % Si-ზე მეტს, მაშინ იგი მხოლოდ დაიჟანგება და არ აღდგება. ამავე აზრს ემხრობა როსტოვცევიც.

ფორმალურად შეგვიძლია მივიღოთ, რომ სილიციუმის აღდგენა მიდის რეაქციით



ხოლო დანარჩენი კომპონენტები ახდენს რა ზემოქმედებას (FeO)-ს კონცენტრაციაზე იწვევს SiO_2 -ის წონასწორობის გადანაცვლებას ამა თუ იმ მხარეს.

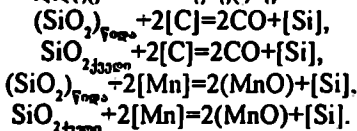
მჟავე ლუმელში, დამჟანგველი ატმოსფეროს ზემოქმედების შედეგად უწყვეტად შედის ჟანგბადი და წიდა-ლითონის გაყოფის ზედაპირზე ხორციელდება რეაქციები:

$$[C]+(FeO)=Fe_{\text{ox}}+CO; \lg K_c = \lg(FeO)[C] = \frac{6900}{T} - 3.5 :$$

$$[Mn]+(FeO)=Fe_{\text{ox}}+(MnO); \lg K_{Mn} = \lg \frac{(FeO)[Mn]}{(MnO)} = -\frac{5550}{T} + 1,86 ;$$

$$[Si]+2(FeO)=2Fe_{\text{ox}}+(SiO_2); \lg K_s = \lg(FeO)^2 \cdot [Si] = -\frac{18200}{T} + 10.64 .$$

მოყვანილ რეაქციებთან ერთდროულად ლითონისა და კაჟ-მიწით გაჯერებული წიდის საზღვარზე ან ლითონისა და ქვიდის საზღვარზე მიდის ალდგენითი რეაქციები:



ამრიგად, დნობის სველისას ლითონში სილიციუმის რაოდენობას განსაზღვრავს ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებების რეაქციათა სიჩქარეები: ერთი მხრივ, წიდით სილიციუმის დაჟანგვისა, ხოლო, მეორე მხრივ, ქვედიდან და წიდიდან სილიციუმის ალდგენის.

მჟავე ლუმელში ჟანგვითი რეაქციების დაჩქარებას ხელს უწყობს წიდაში SiO_2 -ის შემცირება და FeO , MnO და CaO -ს გაზრდა. ამისათვის საჭიროა ლუმელში რკინის ან მანგანუმის მადნის, ახლადგამომწვარი კირის ან წერილად დამსხვრეული კირქვის შეყვანა, ჟანგბადით ან კომპრესორული ჰაერით აბაზანის გაქრევა და ჰაერის სიჭარბის კოეფიციენტის გაზრდა.

სილიციუმის ალდგენის რეაქციის დასაჩქარებლად საჭიროა წიდის გაჯერება კაჟმიწით. წიდის სიბლანტის გაზრდა და მისი აქტიურობის შემცირება. ამას აღწევენ ლუმელში კვარცის ქვიშის შეყვანით, ჰაერის მიწოდების შემცირებით და ლითონის ტემპერატურის გაზრდით.

4.2.9. აირები და არალითონური ჩანართები მჟავე ფოლადში

მჟავე მარტენის ლუმელში გამოდნობილი ფოლადი შეიცავს უფრო ნაკლებ აირებს, ვიდრე ფუძე მარტენში, ელექტროლუმელსა და კონვერტერში გამოდნობილი ფოლადები. ამას ხელს უწყობს შემდეგი ფაქტორები:

1) მუავე პროცესში გამოყენებული საკაზმე მასალების სი-სუფთავე. თხევად ნამზადზე მუშაობისას ღუმელში ასხამენ საკ-მაოდ დეგაზირებულ ნახევარპროდუქტს, რომელიც დუღდა ფუძე ღუმელში. ნახევარპროდუქტში ნახშირბადის მაღალ შემცველობას შეესაბამება ჟანგბადის დაბალი კონცენტრაცია.

მყარ კაზმზე მუშაობისას გამოიყენება სუფთა ნამზადი და ხის ნახშირზე გამოდნობილი თუჯი. მუავე ღუმელის კაზმში არ შეყავთ დაუანგული ბურბუშელა, თუნუქი და სხვა, რომელთაც დიდი რაოდენობით შეაქვთ ხოლმე აირები.

2) მუავე ღუმელში ყუძე ღუმელთან შედარებით, ნაკლები რაოდენობით იყენებენ წიდის წარმოქმნელებს: მადანს, კირს ან კირქვას.

ფუძე ჯართ-პროცესით მუშაობისას გამოიყენება ლითონის წონის 1-2,5 % რკინის მადანს და 4-6 % კირი ან კირქვა. მუავე პროცესის დროს კი მადნის ხარჯი არ აღემატება ლითონის წონის 1 %-ს, კირისა კი - 0-0,5 %-ს, ან საერთოდ არ შეჰყავთ არც ერთი მათგანი. მადანს და კირი, რომლებიც დიდი რაოდენ-ობით შეიცავს ტენს, გვევლინება ლითონში წყალბადის შეტანის წყაროდ.

3) მუავე ღუმელებში გათბობისათვის გამოიყენება მაზუთი, რომლის წვის დროსაც ღუმელის ატმოსფეროში წყლის ორთქლის პარციალური წნევა, 0,11-0,12 ატმ, ნაცვლად - 0,19-0,22 ატმ, რასაც ადგილი აქვს შერეული ან საკოქსე აირის წვისას. გარდა ამისა, მუავე ღუმელში მაზუთის გაფრქვევისათვის ორთქლის ნაცვლად გამოიყენება ჰაერი.

4) კაჟმიწით გაჯერებული ბლანტი მუავე წიდები ხასიათდება მცირე აირგამტარობით. ისინი ძალზე მცირე რაოდენობით ატარებენ წყლის ორთქლს და სრულიად არ ატარებენ აზოტს. ამიტომ დნობის დროს ხდება წყალბადის ან აზოტის შემცირება დუღილის პერიოდში. დუღილის ინტენსიურობის შემცირებისას წყალბადის რაოდენობა ლითონში შესაძლებელია გაიზარდოს. მუავე წიდებში წყალბადის და აზოტის ხსნადობა ბევრად ნაკლებია ვიდრე ფუძე წიდებში.

5) მუავე ფოლადში ისევე, როგორც ფუძე ფოლადში, ჟანგ-ბადის რაოდენობა დამოკიდებულია ლითონში ნახშირბადის კონ-ცენტრაციაზე.

ფუძე პროცესისგან განსხვავებით, მუავე ღუმელში განუწყვეტ-ლივ მიმდინარეობს ლითონში გახსნილი რკინის ქვეჟანგის მოქმე-დება წიდის და ამონაგის მუავე ჟანგეულებთან, რის შედეგადაც ჟანგბადის კონცენტრაცია ლითონში მცირდება. ამიტომ მუავე

ღუმელში დნობის მიმდინარეობისას ლითონში უფრო ნაკლები ჟანგბადია, ვიდრე ფუძე ღუმელის ლითონში.

6) განმჟანგელებს და მალეგირებულ დანამატებს ლითონში შეაქვს გარკვეული რაოდენობის აირები. რადგან მჟაფე ლითონში ჟანგბადი მცირე რაოდენობითაა, ნაკლებია განმჟანგელების ხარჯიც და მათ მიერ შეტანილი აირებიც. ზოგ შემთხვევაში კი ლითონი იმდენად განჟანგულია (კაუბადლდგენით პროცესში), რომ მისი სპეციალური განუანგვა აღარაა საჭირო. მჟაფე ღუმელში მალეგირებელი დანამატების ხარჯიც ნაკლებია, რადგან მალეგირებელი ელემენტების ნამწვი მცირეა ლითონში ჟანგბადის მცირე რაოდენობის გამო.

ჩვეულებრივ მჟაფე ფოლადი შეიცავს:

0,006—0,015 % ჟანგბადს,

2—4 სმ³/100 გ წყალბადს.

0,0010—0,0015 % აზოტს.

გოგირდის მცირე რაოდენობა საკაზმე მასალებში და სათბობოში გეძლევეს საშუალებას მივიღოთ მცირე რაოდენობის გოგირდი მჟაფე ფოლადში. შესაბამისად, ფოლადი ცოტა რაოდენობით შეიცავს სულფიდებს. ასევე მცირეა ოქსიდური ჩანარები ლითონში. საკაზმე მასალების მაღალი ხარისხი და თვითგანუანგვის პროცესი უზრუნველყოფს არაალითონური ჩანარების მცირე რაოდენობას დნობის სეღისას და მზა ლითონში.

მჟაფე ფოლადში არსებული ჩანარების 2/3 სილიკატური ტიპისაა. როდესაც პროცესი მიდის სილიციუმის აღდგენით. არაალითონური ჩანარები წარმოადგენს სუფთა კვარცის მინას, ხოლო, როდესაც დნობა ტარდება რკინის ქვეჟანგის შემცველ თხევადდენად წიდებზე, არაალითონური ჩანარების შედგენილობაც იცვლება და მათში იზრდება რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა.

წიდის მჟავიანობის მომატებით კლებულობს ლითონში ჟანგბადის და ოქსიდური არაალითონური ჩანარების რაოდენობა.

ოქსიდური ჩანარების საერთო რაოდენობა მჟაფე ფოლადში შეადგენს 0,009—0,020 %.

მჟაფე ფოლადის არაალითონური ჩანარებისათვის დამახასიათებელია მომრგვალო ფორმა, რომელიც გაგლინვის შემდეგაც უცვლელი რჩება. ფუძე ფოლადში კი არაალითონურ ჩანარებს აქვთ წაგრძელებული ფირფიტების ან ძეწკვისმაგვარი ფორმა. ამიტომ, ფუძე ფოლადისაგან განსხვავებით, მჟაფე ფოლადს ახასიათებს ერთნაირი მექანიკური თვისებები გლინვის გრძივი და განივი მიმართულებებით (ე.ი. გაგლინვის შემდეგ, მჟაფე

ფოლადი, მექანიკური თვისებების კუთხით. უფრო იზოტროპულია, ვიდრე ფუძე ფოლადი, ხოლო ეს უკანასკნელი კი უფრო ანიზოტროპულია, ვიდრე მჟავე ფოლადი).

4.2.10. დნობის პრაქტიკა მჟავე ლუმელში

ამჟამად მჟავე ლუმელებში დნობის ორი ვარიანტია ცნობილი: კაუბადალდგენითი ანუ პასიური დნობა და დნობა კაუბადის შეზღუდული აღდგენით ანუ აქტიური დნობა.

როდესაც გადნობის შემდეგ ლუმელში არ შეჰყავთ არავითარი დანამატი, მაშინ ლითონის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ხდება წილის გაჯერება ლუმელის ამონაგიდან გადმოსული კაჟ მიწით. წიდა სულ უფრო და უფრო ბლანტი ხდება და ლუმელის ატმოსფეროდან წილის საშუალებით ჟანგბადის ლითონზე გადაცემის სიჩქარე მცირდება. ამის შედეგად, გადნობიდან გარკვეული დროის გავლის შემდეგ სილიციუმის აღდგენის სიჩქარე უფრო მეტი გახდება მისი დაჟანგვის სიჩქარეზე და ლითონში გაიზრდება სილიციუმის რაოდენობა. დნობის ასეთ მეთოდს ეწოდება პასიური ანუ კაუბადალდგენითი პროცესი.

იმ შემთხვევაში, როდესაც დნობის სელისას ლუმელში შეჰყავთ მაღანი; კირი ან კირქვა, იზრდება წილის თხევადდენადობა და მისი ჟანგვითი უნარიანობა, სილიციუმის კონცენტრაცია ლითონში არ იზრდება გარკვეული ზღვრების (ჩვეულებრივ 0,10–0,12 % Si) ზემოთ. დნობის ასეთ მეთოდს უწოდებენ აქტიურ პროცესს ან დნობას სილიციუმის შეზღუდული აღდგენით. აქტიური პროცესის დროს გადნობის შემდეგ და ლითონის მაღალი ტემპერატურისას ლუმელში უმატებენ მცირე კერძებით რკინის ან მანგანუმის მაღანს ან შეუბერავენ ჟანგბადს. მაღნის შეტანის შედეგ იწყება აბაზანის ენერგიული დუღილი და ნახშირბადის ამოწვის სიჩქარე შეადგენს 0,2–0,3 % C/სთ. ლუმელში დანამატების შეყვანას შეწყვეტენ განჟანგვამდე 30–40 წუთით ადრე, მაგრამ ამ მომენტი-სათვის უკვე შექმნილია ისეთი წიდა, რომელიც უზრუნველყოფს დუღილის გაგრძელებას. დუღილის დასასრულს ნახშირბადის ამოწვის სიჩქარე შეადგენს 0,10–0,15 % C/საათში.

ამრიგად, აქტიური პროცესის დროს ნახშირბადის ამოწვა გარკვეული ინტენსიურობით გრძელდება განჟანგვის დაწყებამდე. ამ რეაქციის შედეგად გამოწვეული დუღილი უზრუნველყოფს ლითონში აზოტის რაოდენობის შემცირებას. დუღილის პერიოდის

ბოლოსათვის ნახშირბადის რაოდენობის შემცირებასთან ერთად იზრდება ლითონში ჟანგბადის შემცველობა, რაც გავლენას ახდენს არალითონურ ჩანართებზე. ისინი მდიდრდება რკინის ქვეჟანგით და ხდება უფრო ადვილდნობადი. აქტიური პროცესის დროს ღუმელში აქტიური თხევადენადი წილის არსებობა და ლითონში წონასწორულზე მეტი ჟანგბადის ყოფნა იწვევს აბაზანაში ძლიერი განმჟანგველების შეტანის აუცილებლობას.

მჟავე ფოლადის განჟანგვისათვის გამოიყენება ფერომან-განუმი, ფეროსილიციუმი, სილიკომანგანუმი, ალუმინი, სილიკო-კალციუმი. განმჟანგველების შეყვანის შედეგად საგრძნობლად იზრდება ლითონში ოქსიდური ჩანართების წილი. განმჟანგველების სწორად შერჩევა და მათი კონცენტრაციების გარკვეული ფარდობა უზრუნველყოფს განჟანგვის შედეგად ადვილდნობადი ჩანართების წარმოქმნას, რომლებიც განიცდიან კოალესცენციას (გამსხვი-ლებას) და ადვილად ამოდიან წიდაში.

დასასრულ, უნდა აღინიშნოს, რომ მიუხედავად მჟავე ღუმელ-ში გამოდნობილი ფოლადის მაღალი ხარისხისა, ფუჟე ღუმელებში გამოდნობილ ფოლადთან შედარებით, მას დღეს, ფაქტობრივად, ნაკლებად აწარმოებენ საკაზმე მასალების დეფიციტურობისა და სიძვირის გამო.

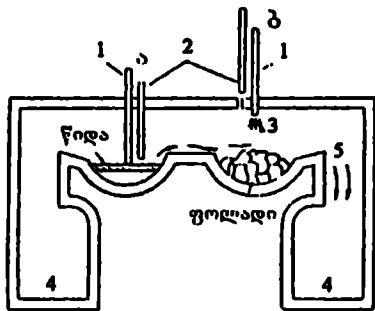
თავი III

ფოლადის დნობის სხვა პროცესები

4.3.1. ფოლადის წარმოება ორაბაზანიან ფოლადსადნობ ღუმელში

ორაბაზანიანი ფოლადსადნობი ღუმელები მარტენის ღუმე-ლების ალტერნატივაა. მარტენის ღუმელებში რეგენერატორების გაუქმების მიზნით, შემოთავაზებული იქნა ორი მარტენის ღუმელის ერთ სადნობ აგრეგატად გაერთიანების იდეა. ამ შემთხვევაში პირველი ღუმელის თაური დაკავშირებულია მეორე ღუმელის მომიჯნავე თაურთან ისე, რომ პირველი ღუმელიდან გამომავალი ნამწვი აირები შედის მეორე ღუმელის სადნობ სივრცეში და ახურებს იქ ჩატვირთულ კაზმს (სურ. 4.7). ფაქტობრივად, ღუმელი შედგება ორი აბაზანისაგან, ორი თაურით, ორი ვერტიკალური

არხით, ორი საწიღურით. ორი ალიბჭეთი, გადამრთველი სარქველებითა და საკვამლე მილით. ღუმელის პირველ ნახევარში ლითონის გაღობა ხდება ჟანგბად-აირისა და ჟანგბადის ქშინების (ფურმების) მეშვეობით. ნაშვვი აირები პირველი საღნობი სიერციდან გადაედინება მეორე საღნობ სიერცეში, ახურებს იქ ჩატვირთულ კაშმს და ვერტიკალური არხით საწიღურის გავლით გადადის ალიბჭეში, იქიდან კი - საკვამლე მილში.

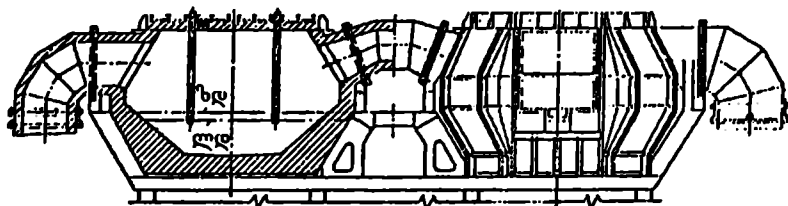


სურ. 4.7 ორბაზანიანი ღუმელის სქემა

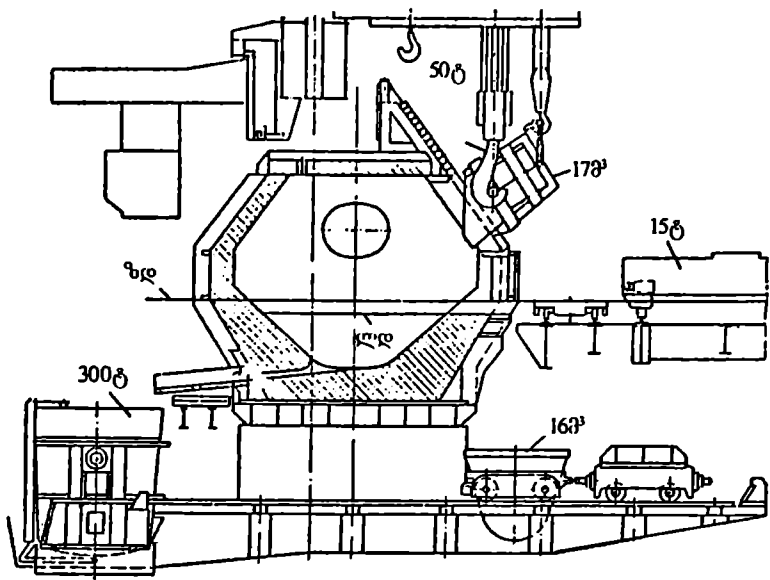
1. ჟანგბად-აირის ქშინები (ფურმები);
2. ჟანგბადის ქშინები;
3. ჟანგბად-აირის ჩირაღდანი;
4. საწიღურები; ა. ქშინების მდგომარეობა გამღარი ლითონის დაყვანის პერიოდში; ბ. ქშინების მდგომარეობა ჯართის გახურების დროს.

პირველი ორბაზანიანი ღუმელები აიგო 1965 წელს მაგნიტოგორსკის, ხოლო შემდგომ კი - ჩეროპოვეციის მეტალურგიულ კომბინატებში (სურ. 4.8 და 4.9). ამ ღუმელების საპროექტო ტევადობა 2X300 ტ, წლიური წარმადობა - 1,8 მლნ ტ ფოლადი. ანალოგიური ღუმელები ექსპლუატაციაში იქნა შეყვანილი აგრეთვე კანადაში, საფრანგეთსა და ამერიკის შეერთებულ შტატებში.

ამ ღუმელების უპირატესობა მარტენის ღუმელებთან შედარებით ისაა, რომ მათ არ აქვთ რეგენერატორები, რის გამოც საგრძნობლად მცირდება მაღალი ხარისხის ცეცხლგამძლე აგურების ხარჯი და, რაც მთავარია, გამოირიცხულია ის მძიმე ფიზიკური შრომა, რომელიც დაკავშირებულია რეგენერატორების წყობურების პერიოდულ გამოცვლასთან. გარდა აღნიშნულისა, ორბაზანიანი ღუმელების წარმადობა საგრძნობლად მეტია მარტენის ღუმელებისაზე. მაგნიტოგორსკის ღუმელის მუშაობიდან გამომდინარე, ორბაზანიანი 2X300 ტ ღუმელის წარმადობა შეადგენს



სურათი 4.8. 2X300 ტ ორბაზანიანი ღუმელის გრძივი კვეთის ხედი. ზდ - ზღურბლის დონე; ლდ - წყნარი თხევადი ლითონის დონე



სურ. 4.9. 2X300 ტ-ნი ორბაზანიანი ღუმელის განივი კვეთის ხედი.
 ზდ - ზღურბლის დონე; ლდ - წყნარი თხევადი ლითონის დონე

150 ტონა ლითონს საათში, რაც ამავე ტონაჟის მარტენის ღუმელის წარმადობას 2,5-ჯერ აღემატება.

ამასთან ერთად გამოიკვეთა ორბაზანიანი ღუმელების უარყოფითი მხარეებიც. სახელდობრ: 1. სამუშაო სივრცის ცუდი პერმეტულობა, რის გამოც დიდია ცივი ჰაერის შეწოვა და სითბოს დანაკარგები; 2. გართულებულია დნობის გამოშვების შემდეგ სამუშაო სივრცის ვიზუალური დათვალიერება, დაზიანებათა დაფიქსირება და მათი რემონტი აბაზანის სივრცის გაუმჭვირვალე რუხი ნამწვი აირებით გაჭუჭყიანების გამო; 3. ჟანგბადით ინტენსიური გაქრევის შემთხვევაში დიდია ლითონის დანაკარგები ნამწვის სახით; 4. მომუშავე პერსონალისათვის მეტად არასასურველი გარემო - საამქრო გაჯერებულია შავი კვამლით.

აღნიშნულის გამო და, რაც მთავარია, მძლავრი - 300-400 ტონიანი ჟანგბად-კონვერტერებში ფოლადის გამოდნობის სწრაფმა განვითარებამ, ფაქტობრივად, შეაჩერა ორბაზანიან ღუმელებში ფოლადის წარმოება.

4.3.2. ფოლადის წარმოების უწყვეტი ხერხები

დღეისათვის მომუშავე ფოლადსადნობი საშუალებები (კონვერტერი, მარტენის, ელექტრული თუ სხვა ლუმელები) ითვლება პერიოდული მოქმედების აგრეგატებად. ჩატარებულმა ექსპერიმენტულმა კვლევებმა ცხადყო, რომ პერიოდული პროცესების უწყვეტით შეცვლას შეუძლია საგრძნობლად გაზარდოს აგრეგატის წარმადობა, შეამციროს საექსპლუატაციო და ტექნოლოგიური დანაკარგები, უფრო ეფექტური გახადოს განმუხანგველი, მალეგირებელი, წიდაწარმომქმნელი და სხვა დანამატების გამოყენება. გარდა ამისა, იზრდება პროცესების სრული ავტომატიზაციის შესაძლებლობა. სამწუხაროდ, არსებობს პრობლემები, რომლებიც სრულად გადაწყვეტა ჯერჯერობით ვერ ხერხდება, რაც ხელს უშლის ამ პროცესების წარმოებაში ფართო დანერგვას. ეს პრობლემები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად:

1. ტექნოლოგიური ხასიათის, რომელიც მოითხოვს თხევადი თუჯიდან სხვადასხვა თერმოქიმიური თვისებების მქონე ელემენტების ერთდროულ მოცილებას. ასე მაგალითად, ფოსფორის მოსაცილებლად საჭიროა შედარებით დაბალი ტემპერატურა და კირით, რკინის ჟანგეულებით გაჯერებული წიდა, ხოლო გოგირდის მოსაცილებლად კი პირიქით, სასურველია მაღალი ტემპერატურა და წიდა რკინის ჟანგეულების მინიმალური შემცველობით. ნახშირბადის მოცილებისათვის საჭიროა დამუხანგველი ატმოსფერო და რკინის ჟანგეულებით გაჯერებული წიდა, ხოლო ჟანგბადის მოცილებისათვის კი – აღდმგენელი ატმოსფერო და წიდაში რკინის ჟანგეულების მინიმალური რაოდენობა.

2. კონსტრუქციული ხასიათის, რომელიც მოითხოვს ისეთი აგრეგატის შექმნას, სადაც შესაძლებელი გახდება ტექნოლოგიური ოპერაციების აუცილებელი მიმდევრობით ჩატარება და ამავდროს მაღალტემპერატურულ რეჟიმში აგრეგატის ცალკეული დეტალებისა თუ კვანძების ხანგრძლივი სტაბილური მუშაობის უზრუნველყოფა.

დღეისათვის შემოთავაზებული ფოლადის წარმოების უწყვეტი ხერხების სხვადასხვა პროექტები შეიძლება პირობითად დაიყოს შემდეგნაირად:

1. პროცესის ორგანიზაციის თვალსაზრისით: მრავალსტადიური, როდესაც ფოლადსადნობი აგრეგატის (რეაქტორის) ცალკეულ უჯრედში ხორციელდება ერთი ან ორი კონკრეტული ტექნოლოგიური ოპერაცია (დეფოსფორაცია, დესულფურაცია, განჟანგვა და სხვა) და ერთსტადიური, როდესაც რეაქტორში

თუჯის ფოლადად გარდაქმნის ტექნოლოგიური ოპერაციია ხორციელდება ერთდროულად ან თითქმის ერთდროულად.

2. აგრეგატის კონსტრუქციის თვალსაზრისით: აგრეგატები, რომლებშიც ტექნოლოგიური ოპერაციები მიმდინარეობს ისე, როგორც ჩვეულებრივ ქვიდურ ღუმელებში და აგრეგატები, რომლებშიც თუჯის გადაამუშავება ხდება გაქრევით (თუჯის და წილის დისპერსიული ნაწილაკების გაქრევა ჟანგბადის ჭაელით).

3. ტექნოლოგიური ოპერაციის ორგანიზაციის თვალსაზრისით: როდესაც აგრეგატში ლითონი და წილა მოძრაობს ერთი მიმართულებით და როდესაც ლითონისა და წილის მოძრაობა ურთიერთსაპირისპიროა.

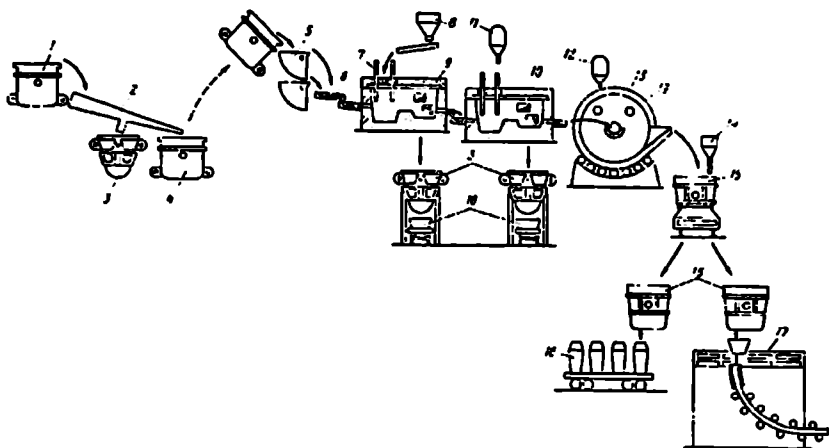
4. საკაზმე მასალების შედგენილობის თვალსაზრისით: როდესაც კაზმი შედგება თხევადი, თუჯისაგან; თხევადი თუჯისა და ჯართისაგან; თხევადი თუჯისა და მეტალიზებული გუნდებისაგან და მხოლოდ ჯართისაგან.

4.10. სურათზე წარმოდგენილია ფოლადის წარმოების უწყვეტი ხერხის ერთ-ერთი პროექტი, დამუშავებული საბჭოთა კავშირის საპროექტო და საკვლევ ინსტიტუტებში (ВНИИМЕТМАШ, ДМЕТИ).

თუჯი ციციხვიდან (1) წილისა და თუჯის სპეციალური განმაცალკეებელი ღარის (2) მეშვეობით გადაისხმება თუჯის ღუმელსგარე დამუშავებისათვის განკუთვნილ ციციხეში (4). საიდანაც სპეციალური დამუშავების შემდეგ ხდება მისი გადასხმა ფოლადსადნობ რეაქტორში (9). აქ მიმდინარეობს თუჯიდან სილიციუმის, ნახშირბადის და ფოსფორის მოცილება. მომდევნო რეაქტორში (10) ხდება ფოლადის საბოლოო კონდიციამდე დაყვანა (განგოვირდება, განჟანგვა, ლევირება) და შემდგომ ფოლადის დამგროვებელ მიქსერში (13) გადასხმა. საიდანაც ფოლადიმილები ციციხვის (15) მეშვეობით ხდება ჩამოსხმა უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე (17) ან ბოყეებში (16).

აღნიშნულ სისტემაში მთავარ კვანძს წარმოადგენს ფოლადსადნობი აგრეგატი-რეაქტორი (9,10). დღეისათვის არსებობს სხვადასხვა სახის ასეთი აგრეგატი. განვიხილოთ თითოეული მათგანი ცალ-ცალკე.

1. BISRA პროცესი. ბრიტანეთის რკინისა და ფოლადის ასოციაციის მიერ შემოთავაზებულია აგრეგატი (სურ. 4.11), რომელშიც თუჯის დაჟანგვა (მინარეყების ამოწვა) ხდება გაფრქვევით. დანადგარი შედგება უძრავი სარეაქციო კამერისაგან (2), რომელშიც სპეციალური მიმღები ხერელიდან (1) ისხმება თხევადი თუჯი და ხდება მისი გაქრევა ჟანგბადით (7). ჟანგბადთან ერთად მიეწოდება ახლადგამომწვარი კირის ფხვნილი და სხვა მასა-



სურ. 4.10. ფოლადის წარმოების უწყვეტი პროცესის პროექტი

1. ციცხვი ბრძმედიდან მიღებული თხევადი თუჯით; 2. წიდა-ლითონის განმაცალკეებელი ღარი; 3. წილის მიმღები ჯამი; 4. თუჯის ციკხვი; 5. სექციური გამანაწილებელი ციცხვები; 6. მიმღები ღარი; 7. ჟანგბადის ქშინი; 8. ჯართის ხეიმირა; 9,10. ფოლადის მარაფინირებულ რეაქტორები; 11,12. ფხნილოვანი კირის და მარაფინირებული მასალების ხეიმირები; 13. ფოლადის დამაგროვებელი მიქსერი; 14. განმზანგველების ხეიმირა; 15. ფოლადის ჩამოსასხმელი ციცხვი; 16. ბოყეები; 17. უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა; 18. წილის სარეზერვო ჯამები

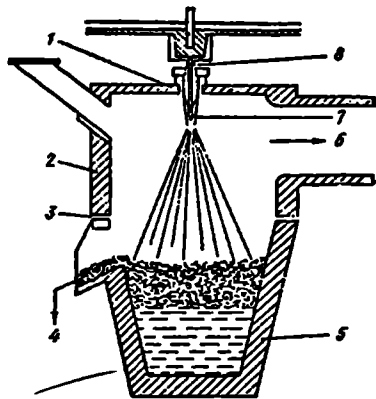
ლები. გაქრეული თუჯი სხვა წიდაწარმოქმნელ მასალებთან ერთად ჩაედინება მოძრავ ციკხვში (5). სადაც ხდება თუჯში გახსნილი მინარევების ამოწვა (C, Si, Mn, P), წილის წარმოქმნა და ლითონის სათანადო კონდიციამდე დაყვანა.

2. VOEST – პროცესი. ავსტრიული მეტალურგიული გაერთიანების მიერ შემოთავაზებულია დანადგარი, რომლის სქემაა სურათზე 4.12.

ციკხვში (1) მოთავსებული თხევადი თუჯი სპეციალური ძაბრის (2) მეშვეობით ჩაედინება აგრეგატში (3), რომლის გვერდით კედელში ჩამონტაჟებულია ჟანგბადის ქშინი (4). მისი მეშვეობით ხდება თუჯის ჭავლის გაქრევა. აგრეგატში ერთდროულად მიეწოდება კირი და სხვა დანამატი (5). გაქრევის შედეგად მიიღება თხევადი ლითონის, კირისა და ჟანგბადის ნარევის ემულსია, რომელიც იღეკება აგრეგატის ქვედაზე, სადაც ხდება ლითონისა და წილის განცალკეება. ჟანგბადით გაჯერებულ თუჯში გრძელდება მინარევების ამოწვა, რის შედეგადაც ლითონისა და წილის ტემპერატურა აღწევს 1600 °C-ს. ზედმეტი წიდა გადმოედინება სპეციალური არხიდან (6), ხოლო ნამწვი აირები პაერგამწმენდი

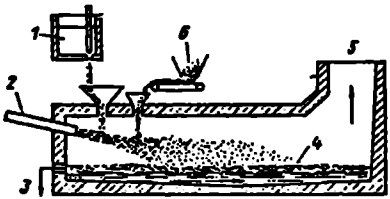
ფილტრების გავლით გადადის საკვამლე მილში.

3. IRSID – პროცესი. საფრანგეთის შავი მეტალურგიის კვლევითი ინსტიტუტის მიერ განხორციელებულია თხევადი თუჯიდან ფოლადის მიღების უწყვეტი ხერხი, რომლის სქემატური სახე წარმოდგენილია 4.13 სურათზე. აგრეგატში ხდება თხევადი თუჯის უწყვეტი მიწოდება (3). მომდევნო ზონაში ლითონს ზემოდან მიეწოდება ჟანგბადისა და კირის ნარევი (1), გვერდითი (2) სპეციალური არხით ხდება მადნისა და სხვა მასალების მიწოდება. ჟანგბადი მიეწოდება წყლით საცივებელი სპეციალური ქშინის მეშვეობით. მიღებული ფოლადი და წიდა გადაედინება მომდევნო ზონაში (5), სადაც ხდება ლითონის, წიდისა და ნამწვი აირების განცალკევება და პროცესის მიმდინარეობს ისე, როგორც ჩვეულებრივ ქველიან ლუმელეებში. პროცესის დამთავრების შემდეგ წიდა სპეციალური არხით (6) ჩაედინება საწიდე ციცხეში. ლითონი გადადის სპეციალურ ინდუქციურ ლუმელში, სადაც ხდება მისი პომოგენიზაცია, შემდგომი ჩამოსხმით.



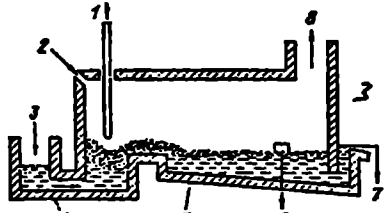
სურ. 4.11. თუჯის დამუშავების პროცესი ჟანგბადის ჭავლის გაქრვის (BISRA - პროცესი)

1. დანამატები; 2. უძრავი სარეაქციო კამერა; 3. ჰაერის მოდინება; 4. წილის გადმოსხმა; 5. მოძრავი ციცხე; 6. გამავეალი აირები; 7. ჟანგბადის ნაკადი; 8. ლითონის მიწოდება.



სურ. 4.12. თუჯის დამუშავების პროცესი ლითონ-წიდა-აირის გაქრვით (VOEST - პროცესი)

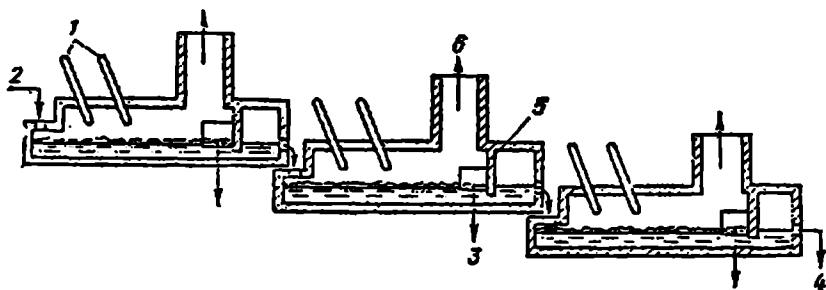
1. თუჯი; 2. გამაშხეფებელი აირის ნაკადი; 3. წიდა; 4. ლითონის მიმღები; 5. გამავეალი აირი; 6. დანამატები



სურათი 4.13. თუჯის დამუშავება უწყვეტი ჩამოსხმით (IRSID - პროცესი)

1. ჟანგბადი და კირი; 2. გამაცივებელი (მადანი); 3. თუჯი; 4. რეაქტორი; 5. გამყოფი აბაზანა; 6. წიდა; 7. ფოლადი; 8. აირი.

4. NRIM – პროცესი. იაპონიის ნაციონალური მეტალურგიული კვლევის ინსტიტუტის მიერ შემოთავაზებულია სამი, ეროზიანეთთან საფეხურებით დაკავშირებული ღუმელი (სურ. 4.14). თხევადი თუჯის მიწოდება ხდება უწყვეტად პირველ ღუმელში (2), სადაც სპეციალური ქშინებით ხდება ლითონის დამუშავება ჟანგბადისა და კირის ნარევით (1). დამუშავების შემდეგ წიდანოცილებული ლითონი გადადის მეორე ანალოგიურ ღუმელში, სადაც პროცედურა მეორდება და ბოლოს, ლითონი გადადის მე-3 ღუმელში. სადაც მთავრდება მისი რაფინირება.



სურ. 4.14. თუჯის დამუშავების პროცესი კასკადური მეთოდით (NRIM - პროცესი). 1. ქშინი; 2. თუჯი; 3. წიდა; 4. ფოლადი; 5. ტიხარი წილის გამოსაყოფად; 6. გამავალი აირი

5. ღარისებრი პროცესი. ამ პროცესის დროს (სურ. 4.15) თხევადი თუჯის მიწოდება ხდება უწყვეტად დანადგარის უკიდურესი მხრიდან (5) და ნელა მიედინება აბაზანის ქვედა სიჩქარით 3 სმ/წთ. თაღში მოთავსებული სპეციალური ხერელიდან (6) ხდება საწიდე და ლითონური დანამატების მიწოდება. ერთდროულად მიმდინარეობს თუჯის დამუშავება ჟანგბადით სპეციალური ქშინების მეშვეობით (1). მიღებული მზა პროდუქტი წიდასთან ერთად სპეციალური არხით (2) გადაედინება ციცხეში.

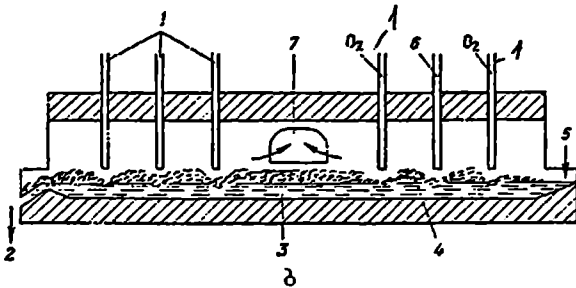
აღსანიშნავია, რომ ყველა ზემოჩამოთვლილი მეთოდი ექსპერიმენტული ხასიათისაა და მათი გამოყენებით დიდი რაოდენობის ლითონი არ მიიღება.

4.3.3. ფოლადის წარმოება ხერხით „მადანი-ფოლადი“

უწყვეტი პროცესით ფოლადის წარმოების ერთ-ერთ ნაირსახეობას წარმოადგენს მადნიდან მაღალპროცენტიანი (90 % Fe)



ა



ბ

სურ. 4.15. თუჯის დამუშავების პროცესი ღარიხებრი მეთოდით
 ა - დანადგარის განივი კვეთი; ბ - დანადგარის გრძივი კვეთი
 1. ქშინი; 2. ლითონის და წილის გამოშვება; 3. ლითონი; 4. წიდა; 5.
 ლითონის შეყვანა; 6. დანაბატების ქშინი; 7. გასაკვალი აირი

მეტალიზებული გუნდების მიღება და შემდგომ მისი გადამუშავება ფოლადსადნობ აგრეგატებში. ასეთი ტექნოლოგიური სქემა, ფოლადის მცირე რაოდენობით (0,5–1,0 მლნ ტ ფოლადი წელიწადში) წარმოების შემთხვევაში უფრო მიზანშეწონილია, ვიდრე ფოლადის წარმოების ტრადიციული სქემა: მადანი – აგლომერატი – ბრძმედი – ფოლადსადნობი აგრეგატი.

ეკონომიკური გათვლებიდან გამომდინარე, კაპიტალდაბანდებები სქემაში „მადანი – აგლომერატი – ბრძმედი – კონვერტერი“ ბევრად უფრო დიდია, ვიდრე სქემაში „მადანი – მეტალიზებული გუნდები – ელექტროლუმელი“.

არსებობს მადნიდან მეტალიზებული გუნდების მიღების სხვადასხვა ხერხი. დღეისათვის ყველაზე გავრცელებულია მადნის აღდგენა აიროვანი აღმდგენელით რეაქტორებში (პილი, ფიორი) და შახტურ ლუმელებში (მიდრეკს, პუროფერი, არმკო და სხვა). ასეთ ლუმელებში იღებენ მეტალიზებულ გუნდებს 90 %-ზე მეტი რკინის აღდგენით. ნახშირბადის შემცველობა ნახვეარპროდუქტებში შეიძლება იცვლებოდეს 0,2–2,2 %-ის ზღვრებში. რაც უფრო მეტია ნახშირბადი ნახვეარპროდუქტში, მით მეტია აღმდგენელი აირის (CO) ხარჯი. ნახვეარპროდუქტში მავნე მინარევების რაოდენობა მინიმალურია (P და S – 0,2 %, N₂ – 0,006–0,008 %).

4.3 ცხრილში მოცემულია სხვადასხვა ტიპის აგრეგატებში მიღებული პროდუქციის შედგენილობა

ცხრილი 3.1.

მეტალიზებული პროდუქტის შედგენილობა, (%).

მიღების მეთოდი	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	C	S	P	წივის რაოდენობა	აღდგენის ხარისხი
მიდრექს პროცესი	92-96	90-96	1,0-2,5	0,01	0,025	3,5	91-95
პუროფერის პროცესი	95,3	90,5	1,0-2,5	0,012	0,015	1,8	94,7
არმკო პროცესი	93,5	92,0	1,0-1,5	0,02	0,02	4,5	98,0
პილი პროცესი	92,5	87,6	<2,0	0,02	0,023	1,5	97,0
ფიორი პროცესი	90,5	86,5	<2,0	0,02	0,02	1,4	97,0

ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში მეტალიზებული გუნდები შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც ლითონური დანამატების გარეშე, ასევე ჯართთან ერთად.

იმის გამო, რომ მეტალიზებულ ნედლეულში საკმაო რაოდენობითაა რკინის ჟანგულები, მათ აღსადგენად დამატებითი ნახშირბადია საჭირო. ეს კი იწვევს ელექტროენერჯის დამატებით ხარჯს - დაახლოებით 35 კვტ-სთ 1 კგ ნარჩენ ჟანგბადზე. ასევე არასასურველია ნედლეულში ფუჭი ნარჩენების არსებობა. მაგალითად, ნედლეულში არსებული ყოველი 1,0 % SiO₂ ზრდის წილის რაოდენობას 30-40 კგ-ით 1 ტონა ფოლადზე, რაც, თავის მხრივ, იწვევს ელექტროენერჯის დამატებით ხარჯს (დაახლოებით 15 კვტ. სთ). აღნიშნული მომენტებიდან გამომდინარე, მეტალიზებულ ნედლეულზე შემუშავებულია მოთხოვნები, რომელთა მიხედვითაც ფუჭი მინარევების - (SiO₂+Al₂O₃)-ის შეყარდება აღდგენილი რკინის რაოდენობასთან არ უნდა აღემატებოდეს 0,05-ს, ხოლო ნარჩენი ჟანგბადის რაოდენობა უნდა იყოს არა უმეტესი 0,03 ტ-ისა 1 ტონა რკინაზე.

თანამედროვე ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები, რომლებიც აღჭურვილია მძლავრი ტრანსფორმატორებით (60-80 მგვტ.) საშუალებას იძლევა უწყვეტი წესით იქნეს მიღებული 1,0-1,5 მილიონი ტონა ფოლადი წელიწადში.

რუსეთში შემუშავდა მერხვე მარტენის ღუმელში მადანსათობიანი გუნდების ან ბრიკეტების დნობის უწყვეტი მიღების ხერხი მდულარე წილის ფენაში (მწუ). ამ ხერხით ღუმელიდან პერიოდულად ხდება ლითონის ნაწილობრივი გამოშვება. ამ პროცესის არსი მდგომარეობს შემდეგში.

20–30 მმ ზომის მადანსათბობიან გუნდებს განაწილებულად ტვირთავენ ღუმელში გამდნარი წიდის ფენაში. წიდა ასრულებს თბოშემცველის როლს და 1500–1650 °C ტემპერატურებზე ხდება რკინის აღდგენა მყარ მდგომარეობაში, რკინის მარცვლების გადნობა და მათი ჩაძირვა გამდნარ ლითონში. გუნდების (ბრიკეტების) მეტალიზაციის პროცესში გამოიყოფა ნახშირჟანგი და სხვა ტექნოლოგიური აირები. რაც იწვევს წიდის ფენის აქტიურ დუღილს. ამასთან ერთად ნახშირჟანგი იცავს აღდგენილ რკინას ღუმელის დამუხანგავი ატმოსფეროს მოქმედებისაგან.

დნობა „მწყ“ შეიძლება ჩატარდეს მონოპროცესით ერთ მერხვე ღუმელში ლითონის დაყვანით საბოლოო მარკის შესაბამის დონეზე ან ორსტადიური პროცესი ნახევარპროდუქტის მიღებით მერხვე ღუმელში და მისი შემდგომი დაყვანით სამარკო ფოლადამდე ელექტროღუმელში.

თითქმის ანოლოგიური პროცესი მაგრამ თბოშემცველად გამდნარი ლითონის გამოყენებით, ჩატარდა რუსთავის მეტალურგიულ ქარხანაში. მადან-სათბობ-კირქვიან ბრიკეტებს ტვირთავდნენ სტაციონალურ მარტენის ღუმელში გახურებული ლითონური კაზმის ზედაპირზე და შემდეგ ახდენდნენ თხევადი თუჯის ჩასხმას. ბრიკეტებიდან ხდებოდა აღმდგენილი აირების გამოყოფა და სითბოს დამატებითი წყაროს შექმნა, ხოლო აღდგენილი რკინა უერთდებოდა გამდნარი აბაზანის თხევად რკინას. „მწყ“ დნობისგან განსხვავებით, დნობა იყო წყვეტილი. მაგრამ მისი ჩატარება მერხვე ღუმელშიც შეიძლება უწყვეტი პროცესით.

V ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

თ ა ვ ი I

ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები

ფოლადსადნობ წარმოებაში ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების გამოყენებას დაახლოებით 100 წლის ისტორია აქვს და ამ ხნის განმავლობაში მათ საკმაოდ დიდი ცვლილებები განიცადეს როგორც კონსტრუქციული, ისე დანიშნულების თვალსაზრისით.

საერთოდ, ელექტროღუმელები გამოიყენება ისეთ დარგებში, რომელთა ტექნოლოგიური ციკლები მოითხოვს მასალების გახურებას ან გადნობას ელექტრული ენერგიით. ელექტრული ენერგია, ძირითადად, გამოიშვავდება სათბობის წვის ენერგიიდან და მას აქვს დიდი უპირატესობა სხვა ენერგიებთან შედარებით იმით, რომ შესაძლებელია მისი შორ მანძილზე გადაცემა. ამასთანავე, ჯერ თბური ენერგიიდან ელექტრულში გადაყვანა, და შემდეგ პირიქით, ელექტრულიდან – თბურში, იწვევს ენერგიის დიდ დანაკარგს და სათბობის წვის ენერგიის მხოლოდ 28-32 % მიდის მომხმარებლამდე. ამიტომ, თავდაპირველად ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები გამოიყენებოდა მარტო ხარისხოვანი და მაღალღევირებული ფოლადების გამოსადნობად ე.ი. ისეთი ფოლადებისა, რომელთა გამოდნობა მარტენის ღუმელებში ან კონვერტერებში მიზანშეწონილად არ მიაჩნდათ. I ტ. ფოლადის გამოდნობაზე იხარჯებოდა 500–დან 1000 კვტ.სთ ელექტროენერგია, ღუმელის ტევადობისა და დნობის ტექნოლოგიური პროცესისაგან დამოკიდებულებით. XX საუკუნის 60-იანი წლების შემდეგ მკვეთრად შეიცვალა შეხედულება ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების დანიშნულებაზე ფოლადის წარმოებაში. ელექტრომოწყობილობების, ტექნოლოგიური და ენერგეტიკული პროცესების საგრძნობი გაუმჯობესების გამო წარმოიშვა ზემოთაღნიშნული ღუმელების შექმნის იდეა, მათ სამუშაო სივრცეში დიდი რაოდენობის ენერგიის შეყვანით. ასეთმა აზრმა კი, თავის მხრივ, შეცვალა შეხედულება იმის თაობაზე, რომ ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების გამოყენება მიზანშეწონილია მხოლოდ ხარისხოვანი და მაღალღევირებული ფოლადების გამოსადნობად. აღნიშნული ღუმელების

გამოყენება დაიწყეს ჩვეულებრივი ხარისხის ფოლადების მისაღებადაც. ამჟამად, ისე სწრაფად მიმდინარეობს ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების კონსტრუქციების სრულყოფა, ტექნოლოგიური პროცესების დახვეწა, რომ ახლო მომავალში სავსებით შესაძლებელია კიდევ განხორციელდეს ახალი აზრების და გადაწყვეტილებების ათვისება ელექტროფოლადსადნობ წარმოებაში.

5.1.1. ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების კლასიფიკაცია და დანიშნულება

ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში სითბოს წყაროდ გამოიყენება ელექტრული ენერჯია. ეს გარემოება კი, მარტენის და კონვერტული პროცესებისაგან განსხვავებით, არ მოითხოვს ჟანგბადის გამოყენებას, რაც საშუალებას იძლევა ღუმელის სამუშაო არეში სურვილისამებრ შეექმნათ დამუხრჩველი, აღმდგენელი ან ნეიტრალური ატმოსფერო. ფოლადის გამოდნობისას მიმდინარეობს სხვადასხვა ქიმიური რეაქცია, როგორც აღდგენითი, ისე დაუხრჩვეთი. სწორედ ამიტომაც, ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები მეტად ხელსაყრელია ნებისმიერი მარკის ფოლადის მისაღებად.

ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების დადებით მხარეებად შეიძლება ჩაითვალოს: 1. ისეთი მაღალი ტემპერატურის მიღება, რომელიც შეუძლებელია ფოლადის სადნობ სხვა აგრეგატებში შეექმნათ, 2. თბური ენერჯიის გამოყოფის მარტივი მართვა და ამის შედეგად ლითონის ტემპერატურის უფრო მეტი სიზუსტით გახურება, ვიდრე სხვა ფოლადსადნობ აგრეგატებში, 3. ლითონური ჯართის გადამუშავების უფრო ხელსაყრელი პირობები, 4. ჯართად შეიძლება გამოვიყენოთ მეტალიზებული გუნდები, 5. ღუმელების კონსტრუქცია და მასში მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესები ადვილად ემორჩილება ავტომატიზაციას, 6. ვაკუუმში ან ინერტულ არეში მუშაობის შესაძლებლობა.

უარყოფით მხარეებს მიეკუთვნება უფრო მცირე წარმადობა, კონვენტრებთან შედარებით ერთნაირი ტევადობის ღუმელებისას. გაძნელებულია, აგრეთვე, კაზმად 100 % თხევადი თუჯის გამოყენება.

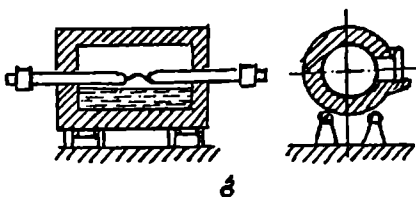
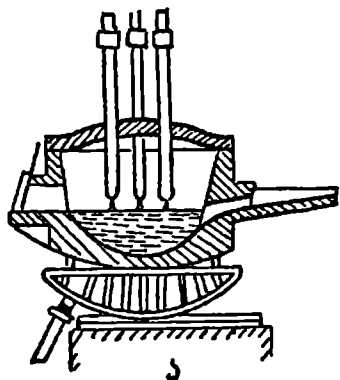
ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში გამოიღობა ყველა სახის ფოლადი და სპეციალური შენადნობები როგორც რკინის, ასევე სხვა ლითონების ფუძეებზე. ფოლადებისა და შენადნობების დნობის ტექნოლოგიების საგრძნობი განსხვავების გამო, მათი

გამოდნობა ერთი და იგივე ტევადობის ღუმელებში შეუძლებელია. ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები მათში გამოსადნობი ლითონის მიხედვით, შეიძლება იყოს 5-დან 200 ტონამდე ტევადობის. არსებობს რამდენიმე ღუმელი 300 და მეტი ტონის მოცულობის. ძირითადათ 5-10 ტონის ტევადობის ღუმელებში გამოიდნობა საიარალო და სპეციალური დანიშნულების მაღალი ხარისხის ფოლადები და შენადნობები, 80-ტონიან ტევადობამდე ღუმელებში – უჟანგავი, მხურვალმდევი და სხვა ლევირებული საკონსტრუქციო ფოლადები, 100-ტონიან და უფრო მეტი ტევადობის ღუმელებში – საერთო დანიშნულების ფოლადები. რასაკვირველია, ასეთი დაყოფა ღუმელების ტევადობის მიხედვით პირობითია და სხვადასხვა დანიშნულების ფოლადები კომბინირებული ხერხებით შეიძლება გამოდნეს სხვადასხვა ტევადობის ღუმელებში. რადგან ლითონის ციცხვში დამუშავების სულ უფრო და უფრო მზარდი საშუალებები იძლევა ამის შესაძლებლობას.

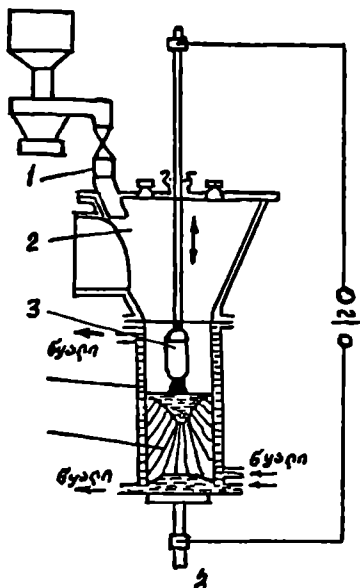
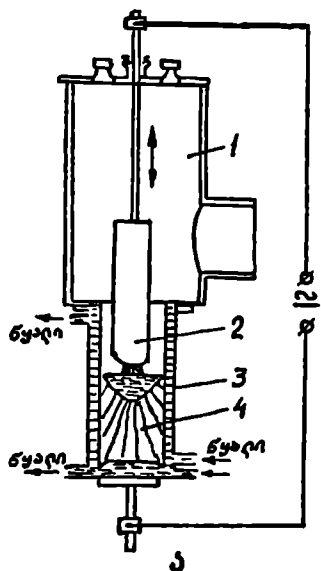
ვინაიდან ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში სითბოს წყაროდ გამოიყენება ელექტრული ენერგია, ბუნებრივია, უფრო ხელსაყრელია დაიყონ ისინი ელექტრული ენერგიის სითბურში გადაყვანის ხერხების მიხედვით. ძირითადად განარჩევენ შემდეგი სახის ღუმელებს:

1. რკალური ღუმელები, სადაც ელექტრული ენერგია სითბურში ელექტრული რკალის მეშვეობით გარდაიქმნება. ასეთი ტიპის ღუმელები გამოიყენება იმ ლითონებისა და შენადნობების გამოსადნობად, რომელთა გასადნობად შედარებით მაღალი (1300 °C და ზევით) ტემპერატურაა საჭირო. რკალურ ღუმელებში ლითონების გამოდნობა შეიძლება მოხდეს უშუალოდ რკალის მოქმედებით, როცა რკალი იკვრება ელექტროდსა და გასადნობ ლითონს შორის, ანდა გამოსხივებით, როცა რკალი წარმოქმნილია ორ ელექტროდს შორის (სურ. 5.1; 5.2; 5.3). პირველი სახის რკალურ ღუმელებს უწოდებენ პირდაპირი გახურების ღუმელებს, მეორეს – არაპირდაპირი გახურების ღუმელებს. მეორე სახის ღუმელების გამოყენებისას ლითონს სითბო ნაწილობრივ მიეწოდება რკალიდან, უმეტესად კი – ღუმელის გახურებული კედლებიდან და თალიდან. ამიტომ, რადგან, ღუმელის ამონაგს მუშაობა უხდება ტემპერატურულად მძიმე პირობებში, ღუმელში მაღალი ტემპერატურის მიღება არასასურველია (ასეთი ღუმელების გამოყენებისას გამოსადნობი ლითონის ტემპერატურა არ უნდა აღემატებოდეს 1400 °C).

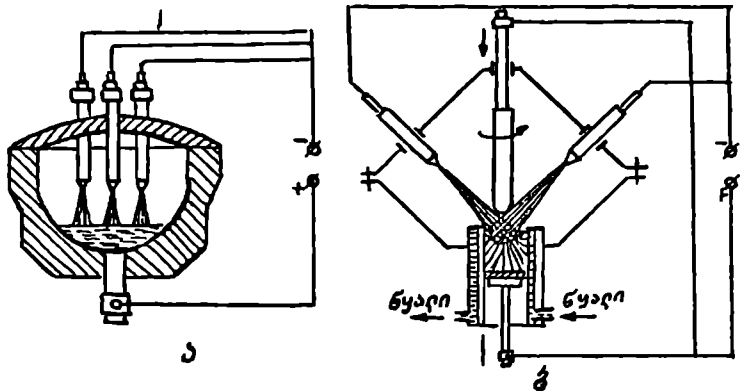
პირდაპირი გახურების ღუმელებში რკალი უშუალოდ გასადნობ ლითონსა და ელექტროდს შორის იკვრება და ამიტომ, რკალის



სურ. 5.1. რკალური ღუმელების სქემატური გამოსახულება; ა-პირდაპირი გახურებით; ბ-არაპირდაპირი მოქმედების



სურ. 5.2. ვაკუუმური რკალური ღუმელების სქემატური გამოსახულება; ა-სახარჯი ელექტროდით; 1-ვაკუუმური კამერა; 2-სახარჯი ელექტროდი; 3-კრისტალიზატორი; 4-მიღებული დადუღებული სხმული. ბ. არასახარჯი ელექტროდით; 1-კაზმის მისაწოდებელი მკეებავი; 2- ვაკუუმ-კამერა; 3-არასახარჯი ელექტროდის ძნელდნობადი საცმი; 4-კრისტალიზატორი; 5-მიღებული დადუღებული სხმული.



სურ. 5.3. პლაზმური ღუმელების სქემატური გამოსახულება.
 ა-კერამიკული ტიგელით; ბ-წყლით საცივებელი კრისტალიზატორით.

მიერ გამოყოფილი სითბოს უმეტესი ნაწილი შთაინთქმება ლითონის მიერ. რასაკვირველია, ამ სახის ღუმელებშიც ხდება მათი კედლებისა და თაღის გახურება რკალის მიერ გამოყოფილი სხივური ენერგიით, მაგრამ ამ ენერგიის კედლებისა და თაღზე ზემოქმედების გავლენა შეიძლება შევამციროთ დნობის სათანადო ტექნოლოგიური პროცესებით. აქედან გამომდინარე, პირდაპირი გახურების ღუმელებში შესაძლებელია ლითონის გადახურება მაღალ ტემპერატურებამდე (1300 °C და ზევით).

რკალური ღუმელები შეიძლება იყოს ვაკუუმურიც, სახარჯი და არასახარჯი ელექტროდებით (სურ 5.2). ასეთ ღუმელებში ყველა მათი კვანძი, რომელზედაც მოდის რკალის მიერ გამოყოფილი სითბო, ცივდება წყლით. თვითონ გამდნარი ლითონი მყარდება კრისტალიზატორში ან გროვდება გარნისაჟიან ტიგელებში. ამიტომ, ასეთ ღუმელებში შეიძლება ჩავატაროთ ისეთი პროცესები, რომლებიც მოითხოვს მაღალ ტემპერატურას. ვაკუუმურ ღუმელებში შესაძლებელია გავადნოთ ვოლფრამი, მოლიბდენი და სხვა ძნელდნობადი ლითონები თუ მათი შენადნობები (~3500 °C).

რკალურ ღუმელებს მიაკუთვნებენ აგრეთვე პლაზმურ ღუმელებს (სურ 5.3). ამ შემთხვევაში სითბოს წყაროდ გვევლინება განივკეთში ძლიერ შეკუმშული, მიმართული რკალური განმუხტვა. შეკუმშულ რკალში დენის სიმკვრივე გაცილებით მეტია, ვიდრე ჩვეულებრივში და ამიტომაც მისი ტემპერატურაც უფრო მაღალია. ინერტული აირების გამოყენებისას ტემპერატურამ შეიძლება მიაღწიოს 30000 °C-ს. ღუმელებში სითბოს ასეთი

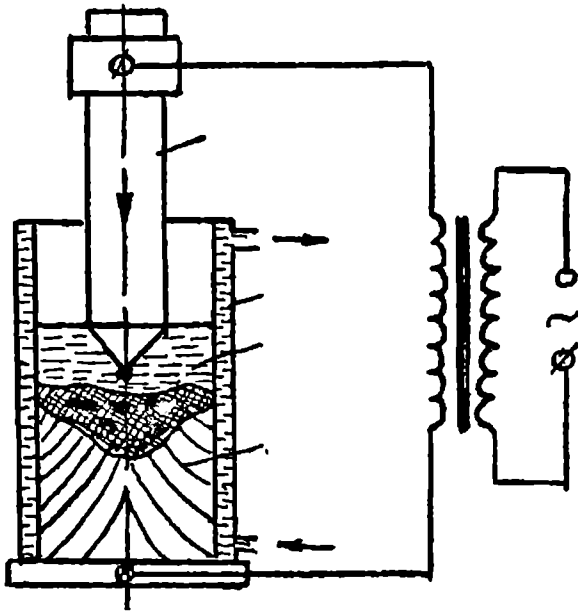
კონცენტრაციის მიღწევის შესაძლებლობა საშუალებას იძლევა სათანადო ტექნოლოგიური პროცესების დაცვით მივიღწიოთ დიდ წარმადობას. პლაზმური ღუმელები ორი სახის შეიძლება იყოს: ტიგელიანი და კრისტალიზატორით. პირველ შემთხვევაში პლაზმური ღუმელი წააგავს ჩვეულებრივ, პირდაპირი გახურების რკალურ ღუმელს. ამ შემთხვევაში ღუმელის წარმადობა იზრდება და გამოდნობილი ლითონის ხარისხიც უმჯობესდება.

2. წინაღობის ღუმელები. ამ შემთხვევაში ელექტრული ენერგია გარდაიქმნება სითბურად გამტარში დენის გავლით. სითბო გამოიყოფა ჯოულ-ლენცის ცნობილი კანონით. $Q=I^2Rt$. სათანადო დენის ძალისა და წინაღობის შერჩევით შეიძლება მივიღოთ სიმძლავრე, რომელიც უზრუნველყოფს ლითონის გადნობას.

წინაღობის ღუმელები შეიძლება იყოს ორი სახის: როცა დენი გადის სპეციალურ გამტარში და მის მიერ გამოყოფილი სითბოთი ხდება გასადნობი ნივთიერების გახურება ან როცა დენი უშუალოდ გასახურებელ სხეულში გადის. იმ ღუმელებს, რომლებშიც დენი უშუალოდ გასახურებელ სხეულში გადის ეწოდება პირდაპირი მოქმედების ღუმელები. ასეთი ღუმელების მაგალითს წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობის ღუმელი - ეწოდ (სურ. 5.4). აქ დენი გადის გამდნარი წიდის აბაზანაში. რადგან წიდის აბაზანას დიდი ელექტრული წინააღმდეგობა გააჩნია, ამიტომ, იგი ძლიერ ხურდება და ადნობს მასში ჩაშვებულ გასადნობი ლითონის ელექტროდს.

3. ინდუქციური ღუმელები. ასეთი სახის ღუმელებში ელექტრული ენერგია თბურად გარდაიქმნება (გასახურებელ ნივთიერებაში) ჯოულ-ლენცის კანონის შესაბამისად. გასახურებელ ნივთიერებაში დენი წარმოიქმნება ინდუქტორის მიერ შექმნილი ცვლადი ველის მეშვეობით. ასეთი ღუმელები წინაღობის ღუმელადაც შეიძლება ჩაითვალოს მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ამ შემთხვევაში გასახურებელ ნივთიერებას ელექტრული ენერგია სხვა ხერხით გადაეცემა. განსხვავება კი შემდეგია: ელექტრული ენერგია გარდაიქმნება ჯერ ელექტრომაგნიტურ, შემდეგ ისევ ელექტრულ და ბოლოს უკვე თბურად (სურ 5.5). ინდუქციური ღუმელები ძირითადად ორ ჯგუფად იყოფა. გულარიანი და უგულარო.

4. ელექტრონულ-სხივური ღუმელები. მათში მოთავსებული სხეულის გახურება ხდება ვაკუუმში, ჩქარი ელექტრონების ნაკადით (დაბომბვით). ელექტრონების აჩქარება ხდება მაღალი ძაბვის ელექტრული ველით (სურ 5.6) დაბალი ვაკუუმის პირობებში

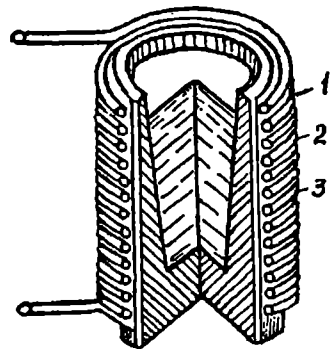


სურ. 54. ელექტროწიდური გადაღობის დანადგარის სქემატური გამოსახულება: 1—სახარჯი ელექტროდი; 2—წყლით საცივებელი ელექტროდი; 3—გამდნარი წიდა; 4—მიღებული დადუღებული სხმული.

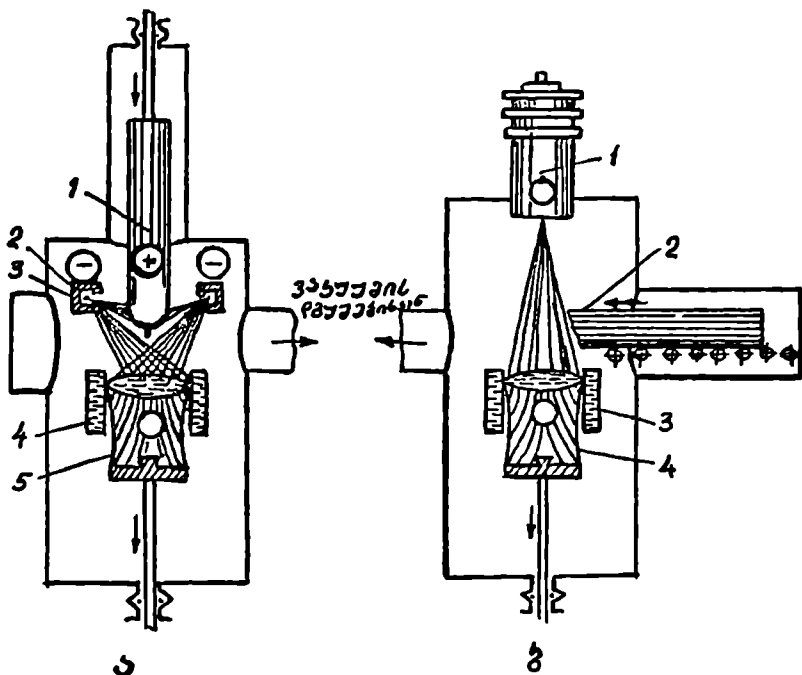
(არაუმეტეს 10–12 კა). წინააღმდეგ შემთხვევაში ელექტრონების ნაკადის ენერგია გადაეცემა აირის მოლეკულებს და არაგასახურებელ ნივთიერებას. ვინაიდან გახურების ამ ხერხის გამოყენებისას აუცილებელია დაბალი ვაკუუმი, გამოსაღობი მასალაც შეიძლება მივიღოთ ზესუფთა.

ელექტრორკალური ღუმელების დანიშნულებას რომ გავეცნოთ, საჭიროა განვსაზღვროდ მათი თავისებურებანი და განვითარების მიმართულება.

როგორც აღვნიშნეთ, ელექტროფოლადსაღობი ღუმელების



სურ. 55. ტიგელიანი ინდუქციური ღუმელის სქემატური გამოსახულება: 1—ინდუქტორი; 2—ტიგელი; 3—ლითონი.



სურ. 5.6. ელექტრონულ-სხივური სადნობი დანადგარების სქემატური გამოსახულება: ა-რგოლისებრი კათოდი; 1-სახარჯი ელექტროდი; 2- რგოლისებრი კათოდი; 3-გერანი; 4-წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი; 5-მიღებული დადუღებული სხმული. ბ. აქსიალური (ღერძული) სატყორცნი: 1-ღერძული სატყორცნი; 2-გადასადნობი ლითონი; 3-წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი; 4-მიღებული დადუღებული სხმული.

კონსტრუქციამ, მათმა დანიშნულებამ და, აქედან გამომდინარე, მათში მიმავალმა ტექნოლოგიურმა პროცესებმა, დიდი ცვლილებები განიცადა. ამჟამად მოქმედებს ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები, რომლებიც ძველი, ე.წ., კლასიკური ტექნოლოგიით მუშაობენ (მკვეთრად გამოსატული გადნობის, დაჟანგვისა და აღდგენის პერიოდებით ან გადადნობის ხერხით. ასეთი ღუმელები შედარებით მცირე ტევადობისაა, ~80 ტონამდე) და ახალი ზემძლავრი ღუმელები, რომელთა დანიშნულებას უმთავრესად წარმოადგენს ჯართის გადადნობა (ამ შემთხვევაში გადნობის და დაჟანგვის პერიოდები მკვეთრად არ არის გამოყოფილი ერთ-

მანეთისაგან და შეიძლება დაემთხვეს ერთმანეთს, ხოლო აღდგენითი პერიოდი შეიძლება სრულიად იყოს გამოტოვებული დნობის ტექნოლოგიური პროცესიდან ან დაყვანილ იქნეს მინიმუმამდე – 10–20 წუთი. ასეთი ღუმელების ტევადობა ძირითადად 80 ტონაზე მეტია).

კლასიკური ტექნოლოგიით მომუშავე და ზემძლავრი ღუმელების განმასხვავებელ ნიშანს წარმოადგენს არა მათი ტევადობა, არამედ 1 ტ ლითონზე მოსული ელექტრული სიმძლავრე.

ელექტრორკალურ ღუმელში შეყვანილი ელექტრული ენერჯის მახასიათებლები გარკვეულ მოთხოვნებს უნდა აკმაყოფილებდეს. ცნობილია, რომ ელექტროენერჯის შორ მანძილზე გადაცემისათვის სასურველია, რაც შეიძლება მაღალი ძაბვა და დაბალი დენის ძალა. ღუმელში კი ხელსაყრელია ელექტროენერჯის შეყვანა დაბალი ძაბვითა და დენის დიდი ძალით. ასეთი ურთიერთგამომრიცხავი მოთხოვნების გამო, ელექტრორკალური ღუმელი აღჭურვილი უნდა იყოს ელექტრული ენერჯის გარდამქმნელებით.

რადგან ელექტრორკალურ ღუმელებში უამრავი სხედასხვა დანიშნულების ფოლადი და შენადნობი დნება, ამიტომ, ბუნებრივია, არსებობს დნობის მრავალი ტექნოლოგია. დნობის ტექნოლოგიის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებლად ითვლება ტემპერატურული რეჟიმი. ტემპერატურის რეგულირება ხორციელდება ღუმელში შეყვანილი ელექტრული სიმძლავრის ცვლილებით: ან იცვლება ძაბვა, ან – დენის ძალა. ტექნოლოგიური პროცესების წასამართავად ხშირად საჭიროა ღუმელში შეყვანილი ელექტრული სიმძლავრის შემცირება. მაგალითად, კლასიკური ტექნოლოგიური პროცესით მუშაობისას, მთლიანი სიმძლავრის გამოყენება მარტო გადნობის პერიოდში შეიძლება. დაჟანგვით და აღდგენით პერიოდებში კი საჭიროა სიმძლავრის შემცირება, რომ არ მოხდეს ლითონის გადახურება და ამონაგის გაფუჭება. ამრიგად, ღუმელში შეყვანილი სიმძლავრის შემცირება აუცილებელი პირობაა და მას ძირითადად ძაბვის დადაბლებით ახორციელებენ, იშვიათად – დენის ძალის მოკლებით. ამის გამო, ელექტროღუმელები უნდა აღიჭურვოს ელექტრული სიმძლავრის მარეგულირებელი მოწყობილობებით. ამასთან, ელექტროღუმელის ელექტრული რეჟიმი ისე უნდა იყოს შერჩეული, რომ მივიღოთ მაღალი ელექტრული მქ და სიმძლავრის კოეფიციენტი.

5.1.2. ელექტრული რკალი

ელექტრულ რკალურ ღუმელში ელექტრული ენერგია გასადნობ ჯაროს გადაეცემა ელექტრული რკალის საშუალებით. ელექტრული რკალი ანუ რკალური განმუხტვა წარმოადგენს აირებში ან ჟანგეულების ოროქლში ელექტრული განმუხტვის ერთ-ერთ სახეს. ჩვეულებრივ პირობებში აირები არ ატარებენ დენს, რადგან ისინი შედგებიან ნეიტრალური ნაწილაკებისაგან. თუ მათში ნეიტრალურის გარდა წარმოიშობა დამუხტული ნაწილაკებიც – თავისუფალი ელექტრონები ან იონები – მაშინ ესენი ხდებიან გამტარები აირში ელექტრული ველის არსებობისას. აირებში განმუხტვას, მისი ხასიათის, თვისებების, და აგრეთვე მათი წარმოქმნელი მიზეზების მიხედვით, ძირითადად ყოფენ ორ ნაწილად: დამოუკიდებელ და დამოკიდებულად. დამოკიდებული რკალური განმუხტვის წარმოქმნისა და არსებობისათვის აუცილებელია გარე ზემოქმედების ფაქტორები – იონიზატორები. დამოუკიდებელი რკალური განმუხტვის წარმოქმნა და არსებობა არ არის დამოკიდებული გარე ზემოქმედების ფაქტორებზე – იონიზატორებზე; ელექტროდებს შორის არსებულ აირში დამუხტული ნაწილაკები წარმოიქმნება ელექტრო ენერგიის წყაროს ხარჯზე.

ელექტრორკალურ ღუმელებში მოქმედი რკალური განმუხტვა ანდა მოკლედ რკალი. თავის თვისებებით და დანიშნულების მიხედვით, საგრძნობლად განსხვავდება სხვა სახის ელექტრული რკალებისაგან: ელექტრორკალურ ღუმელებში რკალი ანთია ხანგრძლივად და მთელი ამ დროის განმავლობაში ის უნდა იყოს რაც შეიძლება მდგრადი; რკალი ხასიათდება დიდი სიმძლავრით შედარებით მცირე ძაბვისა და მაღალი დენის ძალისას; რკალი ანთია დახურულ სივრცეში (ღუმელში) და მის მიერ გამოყოფილი სითბოს მთლიანი შეთვისება ხდება ღუმელის შიდა ზედაპირითა და ჯართით. რადგან ჯართი წარმოუდგენელია ყოველთვის იყოს ერთნაირი, აგრეთვე ღუმელის შიდა ზედაპირები ყოველი დნობის დაწყებისას ერთნაირად არ არის გახურებული და სხვა მიზეზების გამოც, რკალის არსებობის პირობები, ერთი დნობის განმავლობაში, ყოველთვის არ არის ერთნაირი და საგრძნობლად იცვლება. მოცემული სიმძლავრის დროსაც კი რკალმა შეიძლება შეიცვალოს გეომეტრიული და ფიზიკური მახასიათებლები.

რკალის წარმოქმნა ანუ ანთება რომ მოხდეს ორ ელექტროდს შორის, თავდაპირველად ელექტროდები, რომლებზედაც მოდუ-

ბულია ძაბვა, მოჰყავთ შეხებაში, შემდეგ კი ნელ-ნელა აშორებენ ერთმანეთს. ელექტროდების ერთმანეთისაგან მოცილებისას მათ შორის წინააღობა მატულობს, იზრდება სიმძლავრე და ტემპერატურა მკვეთრად იწვეს მაღლა. ასე აინთება რკალი ელექტროლუმენებშიც. ტემპერატურის მომატება დაკავშირებულია გასახურებელი სხეულის მოძრავი ნაწილაკების კინეტიკური ენერჯის ზრდასთან. ელექტროდის მასალაში ყველაზე მეტად მოძრავ ნაწილაკებად ითვლება ელექტრონები. ტემპერატურის ზრდისას მატულობს მათი კინეტიკური ენერჯია და გარკვეულ ტემპერატურაზე ელექტრონების კინეტიკური ენერჯია აღწევს ისეთ სიდიდეს, რომელიც აღემატება ელექტროდის ზედაპირზე პოტენციური ენერჯის წინააღობას და ამოვარდება ელექტროდიდან. გახურებული სხეულის მიერ ელექტრონის გამოსხივების მოვლენას თერმოელექტრული ემისია ეწოდება. ელექტროდის მასალიდან ელექტრონის მოწყვეტა შესაძლებელია მაშინ, როცა მისი კინეტიკური ენერჯია მის მოწყვეტის მუშაობას აღემატება. სხვადასხვა მასალისათვის ელექტრონის მოსაწყვეტად საჭირო მუშაობის სიდიდე განსხვავდება ერთმანეთისაგან.

მასალა	Mg	AL	V	Mo	Fe	C	W
მუშაობა ელექტრონის მოწყვეტაზე, ევ*	3,46	3,74	3,80	4,27	4,36	4,39	4,50

ემისიის დენის სიმკვრივე დამოკიდებულია ელექტროდის ტემპერატურაზე და გამოიხატება შემდეგნაირად (დუშმანის ფორმულა)

$$\delta = AT^2 \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

δ - ემისიის დენის სიმკვრივე;

T - ტემპერატურა;

\exp - ექსპონენტა;

A და B - ელექტროდის მასალის თვისებებზე დამოკიდებული მუდმივები.

როგორც ამ ტოლობიდან ჩანს, ემისიის დენის სიმკვრივე მკვეთრად მატულობს ტემპერატურის ზრდასთან ერთად.

რკალი შეიძლება იყოს მუდმივი და ცვლადი დენის. მუდმივი დენის რკალისას ერთი ელექტროდი მუდამ წარმოადგენს კათოდს, მეორე - ანოდს. რკალის წარმოქმნისას ხურდება ელექტროდების ბოლოები და მათგან ხდება თერმოელექტრული

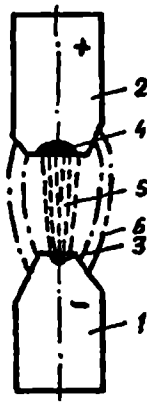
* ელექტრონვოლტი

ემისია. მაგრამ ანოდოიდან ამოტყორცნილი ელექტრონები ისევე ელექტროდს უბრუნდებიან ელექტრული ველის ზეგავლენით. ხოლო კათოდიდან ამოტყორცნილ ელექტრონებს მიენიჭებათ მოძრაობითი მიმართულება ანოდისაკენ იმავე ველის მეშვეობით.

ცვლადი დენის გამოყენებისას რკალის არსებობის პირობები მკვეთრად იცვლება. ამ შემთხვევაში ელექტროდებს შორის არსებული აირის თბური მდგომარეობა და დენის ძალა გამუდმებით იცვლება. ყოველი ნახევარპერიოდის განმავლობაში ქსელის ძაბვა და დენი აღწევს მაქსიმუმს ნულზე გაველით. ყოველ პერიოდში ელექტროდი და გასახურებელი ნივთიერებები რიგრიგობით ხდებიან ხან კათოდი, ხან – ანოდი. რკალზე მოდებული პოტენციალი თანდათან მცირდება გადის ნულზე და შემდეგ ისევე აღწევს მაქსიმუმს. პოტენციალის შემცირებას თან ახლავს იონიზებული ნაწილაკების რაოდენობის შემცირება; დროის ერთეულში უფრო ცოტა იონიზებული ნაწილაკი წარმოიქმნება, ვიდრე განიმუხტება. როცა პოტენციალი მიდის ნულთან, ელექტროდებს შორის აირის ტემპერატურა ეცემა. მთელი აირი კარგავს იონებს და მისი ელექტროგამტარობაც ეცემა. იმისდა მიხედვით, თუ როგორი სახის კვების რა ძაბვაა მიყვანილი ელექტროდებზე და ელექტროდებს შორის მყოფი აირის გაცივება რა პირობებში ხდება, პოტენციალის ნულზე გადასვლის შემდეგ, რკალი შეიძლება აინთოს ან საერთოდ ჩაქრეს. რკალური განმუხტვის სქემა მოცემულია სურათზე 5.7. იგი შედგება კათოდური და ანოდური ლაქებისაგან, რკალის სვეტისაგან, რკალის ალისაგან. განვიხილოთ რკალური განმუხტვის (რკალის) ცალკეული ნაწილები:

1. კათოდური ლაქა. თერმოელექტრონული ემისიის გამო, კათოდური ლაქიდან გამოიოტყორცნება ელექტრონები. რადგან კათოდური ლაქის ტემპერატურა ყველაზე მაღალია (3000 °C და მეტი) კათოდის ზედაპირზე, ამიტომ, ელექტრონები ძირითადად აქედან ამოიტყორცნება. კათოდური ლაქა ერთ ადგილას არ არის განჩერებული. იგი განუწყვეტლივ მოძრაობს – გადაადგილდება იქით, საიდანაც ელექტრონების გამოტყორცნაზე დახარჯული მუშაობა უმცირესია.

2. რკალის სვეტის კათოდური ნაწილი. რკალის სვეტის კათოდური ნაწილის სიგრძე განისაზღვრება ამოტყორცნილი ელექტრონის თავისუფალი განარბენის მანძილით. ეს მანძილი უკუპროპორციულადაა დამოკიდებული ელექტროდებს შორის არსებული აირის წნევაზე. რკალის სვეტის კათოდურ ნაწილში ელექტრონები აირის მოლეკულებთან დაჯახებამდე დიდ



სურ. 5.7. რკალური განმუხტვის სქემა: 1-კათოდი; 2-ანოდი; 3-კათოდური ლაქა; 4-ანოდური ლაქა; 5-რკალის სვეტი - რკალის პლაზმა; 6-ალი.

ენერგიას ღებულობენ და ამიტომ ხდება ამ მოლეკულების იონიზაცია. აირის დადებითი იონები ეცემა კათოდზე და გადასცემს თავის ენერგიას, რაც, თავის მხრივ, ხელს უწყობს კათოდის ტემპერატურის აწევას. რკალის სვეტის კათოდურ ნაწილში გამოიყოფა ელექტრორკალის სიმძლავრის ~10 %.

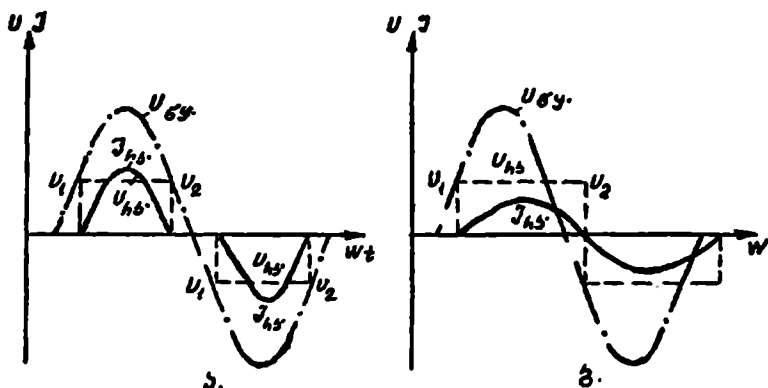
3. ელექტროდებს შორის წარმოიქმნება ე.წ. ელექტრული განმუხტვის (რკალის) სვეტი, რომელიც წარმოადგენს აირების და ელექტროდების მასალების ორთქლის ნარევს. ეს ნარევი ძლიერ იონიზებულია. დენის გადასვლა ხორციელდება ელექტრონების მოძრაობით ანოდისაკენ და დადებითი იონებისა - კათოდისაკენ. რკალის აღნიშნულ ნაწილში ტემპერატურა ~1400 °C ღწევს. რკალის სვეტში ხდება ძაბვის ძლიერი ვარდნა (~50-60 %) და შესაბამისად დიდი სიმძლავრის გამოყოფა.

4. ანოდური უბანი. ძაბვის ვარდნის ანოდური უბნის სიგრძე ამდენადმე უფრო მეტია, ვიდრე კათოდურისა. ამ უბანში მოიყოფა რკალის სიმძლავრის ~30 %.

5. ანოდური ლაქა. ანოდურ ლაქაზე ხდება ამოტყორცნილი ელექტრონების ვარდნა. ანოდი რკალურ ღუმელებში შეიძლება უკონს როგორც მყარი ჯართი, ისე თხევადი ლითონი. ელექტრონები კოდს გადასცემენ კათოდიდან თავის მოწყვეტაზე დახარჯულ მუშაობას და იმ ენერგიას, რომელსაც იძენენ ელექტრული დაბეჭდვით განსხვავებული უბნების გავლისას.

რკალური ფოლადსადნობი ღუმელები მუშაობენ ცვლად და მუდმივ დენზე. ცვლადი დენის დროს ყოველი ნახევარპერი-

ოდის გავლის შემდეგ ძაბვა და დენი ძალა აღწევს უმაღლეს მნიშვნელობას – მაქსიმუმს და შემდეგ ნახევარპერიოდში გადის ნულზე (სურ. 5.8). ამ სურათზე მოყვანილი გრაფიკი შეესაბამება იდეალიზებულ დენის მყისიერ მნიშვნელობას, რკალის ძაბვას და მკვებავი წყაროს ძაბვას. ძაბვა, ნულოვანი მნიშვნელობის გავლის შემდეგ, იწყებს ზრდას, მაგრამ რკალი არ შეიკრება მანამდე, სანამ ძაბვა არ მიაღწევს გარკვეულ მნიშვნელობას (U_1). ამ სიდიდეს რკალის ანთების ძაბვა ეწოდება. რკალის ანთებისთანავე ქსელში ჩნდება დენი, რომელიც იზრდება პერიოდულობის კანონით და განსხვავებულია სინუსოიდისაგან. რკალი გაქრება ძაბვის გარკვეული მნიშვნელობისას (U_2) მანამდე, სანამ მიაღწევს ნულს. შემდგომ ყველაფერი თავიდან იწყება.



სურ. 5.8. რკალის დენის $J_{გვ}$, რკალის ძაბვის $U_{გვ}$ და მკვებავი წყაროს $U_{გვ}$ ძაბვის მყისი მნიშვნელობების მრუდი: ა-ქსელში ინდუქციურობის არარსებობისას; ბ-ქსელში ინდუქციურობის არსებობისას.

ამრიგად, რკალი ანთია წყვეტილად. დრო, რომლის განმავლობაშიც რკალი გაწყვეტილია, დამოკიდებულია სხვადასხვა მიზეზზე (ელექტროდების მასალა, ელექტრული ქსელის ინდუქციური წინაღობა და სხვა). მაგალითად, თუ რკალი იკრება გრაფიტის ორ ელექტროდს შორის, მაშინ დენის პოლარობის შეცვლისას არ იცვლება არც კათოდის, არც ანოდის მასალა – გრაფიტი და რკალი უფრო დიდხანს ანთია იმ შემთხვევასთან შედარებით, როდესაც ერთი ელექტროდი გრაფიტია, ხოლო მეორე – რკინა. ასეთი სურათი გვაქვს სწორედ ელექტრორკალურ ღუმელში. ერთ-ერთი ელექტროდია გრაფიტის ელექ-

ტროდი, მეორე – ლითონური კაზმი. როდესაც კათოდად იმუშავენ გრაფიტის ელექტროდი, მაშინ რკალი შეიკვრება და იგი გამოტყორცნის ელექტრონებს. როცა პოლარობა შეიცვლება (განსაკუთრებით დნობის დასაწყისში), ლითონური ჯართი ცივია და კარგ თბოგამტარობას ამჟღავნებს. ამიტომ, რკალის მიერ გახურებული ადგილიდან სითბო სწრაფად გადაეცემა ჯართის სხვა ნაწილებს და იგი იმდენად გაცივდება, რომ ელექტრონებს აღარ გამოტყორცნის. ამრიგად, რკალი ჩაქრება. ასეთი წყვეტილი რკალით ღუმელის მუშაობა, რასაკვირველია, არახელსაყრელია, რადგან მთლიანად ვერ გამოიყენება ტრანსფორმატორის სიმძლავრე და დნობის ხანგრძლივობა იზრდება. იმისათვის, რომ არ ხდებოდეს რკალის გაწყვეტა, საჭიროა ღუმელის ელექტროქსელში ჩართული იყოს ინდუქციური წინაღობა (ეს ეხება უმთავრესად დაბალი სიმძლავრის ტრანსფორმატორით აღჭურვილ ღუმელებს. დიდი სიმძლავრის ტრანსფორმატორების გამოყენებისას მათი საკუთარი ინდუქციური წინაღობა იმდენად მაღალია, რომ ხშირად ცალკე ინდუქციური წინაღობის ჩართვა ღუმელის ელექტროქსელში საჭირო არ არის). ცვლადი დენის წრედში ინდუქციური წინაღობა თავისთავში აგროვებს (აკუმულირებს) პოტენციალური ელექტრომაგნიტური ენერჯიის მარაგს. ამ ენერჯიით წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტრავებული ძალა წინააღმდეგობას უწევს ქსელში დენის შეცვლას. ქსელში დენის ძალის მომატებისას იზრდება ენერჯიის მარაგი ინდუქციურ წინაღობაში. ამასთან, მისი ელექტრომაგნიტრავებული ძალა მიმართულია წყაროს ძაბვის საწინააღმდეგოდ. ამიტომ ქსელში ინდუქციობის არსებობისას დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა უფრო მცირეა, ვიდრე უინდუქციო ქსელისას. წყაროს ძაბვის და კონტურში დენის ძალის შემცირებისას, ინდუქციურ წინაღობაში დაგროვილი ენერჯია გამოიყოფა ქსელში და წინააღმდეგობას უწევს დენის ძალის შემცირებას. ამის გამო, რკალზე ძაბვის ენერჯიის მარაგი და კონტურში დენის ძალა არსებობს მაშინაც, როცა წყაროს ძაბვა გადის ნულოვან მნიშვნელობას. მაშინ, როცა ინდუქციურ წინაღობაში ენერჯიის მარაგი მთლიანად ილევა, წყაროს ძაბვა აღწევს გარკვეულ მნიშვნელობას საწინააღმდეგო პოლარობაში. თუ ეს მნიშვნელობა საკმარისია იმისათვის, რომ რკალი შეიკრას, მაშინ რკალი განუწყვეტლივ ანთია. აქედან გამომდინარე, ისე უნდა შეირჩეს ინდუქციური წინაღობა, რომ მისი ენერჯიის მარაგი საკმარისი იყოს წყაროს ძაბვის ისეთი მნიშვნელობის მისაღწევად საწინააღმდეგო პოლარობაში, რომ რკალი არ ჩაქრეს.

5.1.3. რკალური ფოლადსადნობი ღუმელების სამუშაო სივრცე

რკალური ფოლადსადნობი ღუმელები მიეკუთვნება ისეთი სახის დანადგარებს, რომლებშიც გამოყენებულია ე.წ. სითბოს გარეშე წყარო. ეს გარემოება ისე არ უნდა წარმოვიდგინოთ, თითქოს რკალი ანთია ღუმელის გარეთ. გამოთქმაში – სითბოს გარეშე წყარო – იგულისხმება, რომ გასადნობი ლითონი ხურდება რკალის მიერ გამოყოფილი სითბოთი, ხოლო რკალი უშუალოდ ლითონში კი არ ანთია, არამედ მის ზედაპირზე და მის გარეთ. გარდა ამისა, ღუმელში ჩატვირთული ჯართი ხურდება ღუმელის ამონაგში დაგროვილი სითბოს ხარჯზეც. იმისათვის რომ მიღწეული იქნეს ღუმელის მუშაობის მაღალი მაჩვენებლები საჭიროა არა მარტო ტრანსფორმატორისა და ღუმელის ზომების, არამედ დნობის რაციონალური ენერგეტიკული რეჟიმის შერჩევაც, რათა უზრუნველყოთ ღუმელში თბური ნაკადების ყველაზე ხელსაყრელი განაწილება. ღუმელის სამუშაო სივრცეს ორ ძირითად ნაწილად პყოფენ: 1. აბაზანა, რომელშიც გროვდება გამდნარი ლითონი და წიდა; 2. ღუმელის თავისუფალი სივრცე. თავისუფალი სივრცე ჩნდება მას შემდეგ, როცა ღუმელში ჩატვირთული ლითონური კაზმი, რომელიც დნობის დასაწყისში ღუმელის მოთელ სამუშაო სივრცეს იკავებს, გადნება.

რადგან, დნობის ტექნოლოგიური პროცესი მთლიანად დამოკიდებულია დნობის ტემპერატურულ რეჟიმზე, ხოლო, თავის მხრივ, დნობის ტემპერატურული რეჟიმი გავლენას ახდენს ღუმელის ცალკეული კვანძის გადახურებაზე თბოგადაცემის გამო, საჭიროა, უპირველეს ყოვლისა, განვიხილოთ თბოგადაცემა ღუმელის სამუშაო სივრცეში.

5.1.4. თბოგადაცემა რკალური ღუმელის სამუშაო სივრცეში

რკალურ ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში დნობის ტექნოლოგიური პროცესები ხასიათდება მუშაობის პერიოდულობით. თავის მხრივ, ეს პერიოდულობა მჭიდროდ არის დაკავშირებული რკალსა და ღუმელის მუშა ზედაპირებს შორის თბოგადაცემაზე.

ტექნოლოგიური პროცესები შეიძლება დაიყოს სამ პერიოდად: 1. როდესაც ღუმელში არ მიეწოდება ენერგია (ამ დროს სრულდება დამხმარე სამუშაოები: ღუმელის გამოწმენდა, შეკე-

თება, ჩატვირთვა, თხევადი ლითონის გამოშვება). ამ პერიოდში ღუმელი კარგავს სითბოს, რომელიც დაგროვილია მის ამონაგში; 2. ენერგეტიკული ანუ რომლის განმავლობაშიც ხდება ლითონის გახურება და გადნობა; 3. ტექნოლოგიური, რომელიც შეიცავს დამუანგველ და აღმდგენელ პერიოდებს. თავის მხრივ, რკალსა და ღუმელის მუშა ზედაპირებს შორის თბოგადაცემა, თავისი ხასიათის და ტექნოლოგიური პროცესების გათვალისწინებით, იყოფა ასევე სამ ნაწილად: 1. დნობის დასაწყისი. ამ დროს რკალი იკერება მყარ კაზმთან. რკალი თანდათან აღნობს თავის ქვეშ მოხვედრილ კაზმს და ამგვარად ჩაადნობს ჯართში, ე.წ. „ჭებს“. როცა ელექტროდი მიაღწევს ქვედს იქ მას ხედება უკვე საკმარ რაოდენობის გამდნარი ლითონი. წინააღმდეგ შემთხვევაში, რკალი გადაახურებდა ქვედის ამონაგს და მას ძლიერ დააზიანებდა; 2. „ჭების“ ჩადნობის შემდეგ რკალის მიერ გამოყოფილი სითბო მთლიანად შთაინთქმება გაუდნობელი კაზმისა და გამდნარი ლითონის მიერ, რადგან კაზმი გარს ერტყმის რკალს, ხოლო რკალი შეკრულია თხევად ლითონთან. კაზმის გადნობასთან ერთად, ზევით იწევს გამდნარი ლითონის დონე. მასთან ერთად ზევით იწევა ელექტროდიც და ბოლოს რკალი თანდათანობით შიშვლდება მყარი კაზმისაგან; 3. კაზმის გადნობის შემდეგ იწყება დნობის ტექნოლოგიური პერიოდი, რომლის დროსაც რკალი უშუალოდ ახურებს გამდნარ ლითონს და ღუმელის ამონაგს. ამასთან, ამონაგის ტემპერატურა უფრო მაღლა იწევს, პირველ და მეორე პერიოდთან შედარებით.

ყველაზე უფრო ხელსაყრელი პირობები კაზმის გახურებისათვის იქნება მაშინ, როცა ელექტროდები ჩაადნობს „ჭებს“. ამ შემთხვევაში ღუმელის კედლები დაცულია რკალის გამოსხივებისაგან გაუდნობელი კაზმით, ხოლო კამარას იფარავს გახურებისაგან თვითონ ელექტროდი. გასადნობი ლითონი კარგი თბოგამტარი მასალაა და ამიტომ იგი შთანთქავს არა მარტო რკალის მიერ გამოყოფილ სითბოს, არამედ ღუმელის კედლებში დაგროვილ სითბოსაც, რადგან ისინი ამ მომენტისათვის უფრო გახურებულია (წინა დნობის შედეგად), ვიდრე თვით კაზმი. ეს გარემოება საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ ტრანსფორმატორის მთლიანი სიმძლავრე ისე, რომ არ დავაზიანოთ გადახურებით ღუმელის კედლები და კამარა. კაზმის ძირითადი ნაწილის გადნობის შემდეგ, რკალის მიერ გამოყოფილი სითბო გადაეცემა არა მარტო ლითონს, არამედ ღუმელის კედლებსაც, რადგან ელექტროდების ირგვლივ გასადნობი კაზმი აღარ იქნება და ის აღარ შეზღუდავს რკალის მიერ გამოსხივებულ სითბოს მიაღწიოს ღუმელის კედლებსა და თაღამდე.

რკალურ ღუმელში თბოგადაცემის შესასწავლად საჭიროა გავითვალისწინოთ შემდეგი გარემოებები: რა რაოდენობის თბური ნაკადი მოვა გამდნარ ლითონსა და ამონაგზე, განვსაზღვროთ ღუმელის ცალკეულ ნაწილებზე მოსული რკალის გამოსხივება. ამ გარემოების გათვალისწინება პრაქტიკულად საკმაოდ რთულია და მიმართავენ რამდენიმე დაშვებას, რათა შექმნან მოდელი მომუშავე ღუმელში თბური ნაკადების მიმართულებებისა. პირველ ყოვლისა, დაუშვათ, რომ რკალი წარმოადგენს გამოსხივების წერტილოვან წყაროს. მაშინ შეგვიძლია გამოვიყენოთ კეპლერის კანონი, რომლის საშუალებითაც განვსაზღვრავეთ სითბოს წერტილოვანი წყაროდან რაიმე სიბრტყეზე მოსულ გამოსხივებას. რასაკვირველია, ჩვენ შემთხვევაში რკალი არ წარმოადგენს სითბოს წერტილოვან წყაროს და ამიტომ კეპლერის კანონში შეყვანილია ე. წ. შესწორების კოეფიციენტი $k_{კა}$:

$$q = k_{კა} \frac{P_{რკ} \cos \varphi}{4\pi R^2} \text{ კვტ/მ}^2$$

$P_{რკ}$ რკალის სიმძლავრეა, კვტ;

R მანძილია გამოსხივების წყაროდან სიბრტყის ცენტრამდე, მ;
 φ - კუთხე R რადიუსის მიმართულებასა და დასხივებულ სიბრტყეზე დაშვებულ ნორმალს შორის, გრად;

$k_{კა}$ შესწორების კოეფიციენტია, რომელიც ითვალისწინებს რკალის მიერ სხვადასხვა მიმართულებით არაერთგვაროვან გამოსხივებას.

თუ რატომ აქვს ადგილი არაერთგვაროვან გამოსხივებას ეს აიხსნება იმით, რომ რკალს ზევიდან ეფარება ელექტროდი. ხოლო გვერდებიდან - წიდა. ამიტომ, რკალის გამოსხივების განაწილება დამოკიდებული უნდა იყოს:

1. $\frac{D_{ჯლ}}{l_{რკ}}$ შეფარდებაზე ანდა რადგან $U_{რკ}$ პირდაპირ დამოკი-

დებულია შიდა $l_{რკ}$ -თან, $\frac{D_{ჯლ}}{U_{რკ}}$ და $\frac{\Delta_{წიღ}}{l_{რკ}}$ შეფარდებაზე, ანდა

$\frac{\Delta_{წიღ}}{U_{რკ}}$ -ზე; კიდევ დამოკიდებულია რკალის სვეტის ძაბვაზე $U_{სვ}$

და ძაბვის ანოდურ-კათოდურ ვარდნაზე $U_{აკ}$, რადგან $\frac{U_{სვ}}{U_{აკ}}$

შეფარდება განსაზღვრავს $l_{რკ}$;

2. ელექტროდის ქვემოდან რკალის გამოხერხებაზე ღუმელის კედლების მხარეს (როცა საქმე გვაქვს სამფაზა ღუმელებთან, ხოლო სამფაზა ღუმელები წარმოადგენს ძირითად ფოლადსადნობი-დანადგარებს). აქ გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

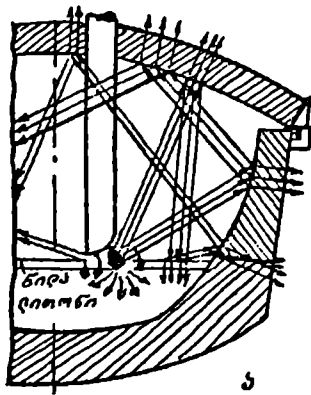
$U_{\text{რკ}}$ – რკალის ძაბვა; $D_{\text{ელ}}$ – ელექტროდის დიამეტრი; $l_{\text{რკ}}$ – რკალის სიგრძე; $\Delta_{\text{წილ}}$ – წილის სისქე; $U_{\text{სე}}$ – რკალის სეგტის ძაბვა; $U_{\text{ძაბ}}$ – ძაბვის ანოდურ-კათოდური ვარდნა.

ქაზმის გადნობის შემდეგ რკალს ამონაგასა და აბაზანას შორის შესაძლებელია გექონდეს თბოგადაცემის ორი სქემა რკალის

ეკრანიებისაგან დამოკიდებულებით: 1. როდესაც $\frac{D_{\text{ელ}}}{U_{\text{რკ}}}$ ანუ

$\frac{D_{\text{ელ}}}{l_{\text{რკ}}}$ და $\frac{\Delta_{\text{წილ}}}{l_{\text{რკ}}}$ შეფარდებები მცირე მნიშვნელობისაა, ანუ

რკალის მცირე ეკრანიებისას აბაზანა მხოლოდ ნაწილობრივ ხურდება იმ სითბოთი, რომელიც თბოგამტარობით გადაეცემა გახურებული ადგილებიდან (ელექტროდების ქვეშ მყოფი და რკალის უშუალო მოქმედებით გადახურებული თხევადი ლითონიდან), ხოლო ძირითადი კი – ამონაგიდან, რომელიც გამოასხივებს რკალის მიერ გამოყოფილ სითბოს წიდაზე და შემდეგ წიდიდან გადაეცემა ლითონს (სურ 5.9). თბოგადაცემის ასეთი მიმდინარეობისას ამონაგის ტემპერატურა უფრო მაღალი უნდა იყოს, ვიდრე წილისა, ხოლო წილის ტემპერატურა უნდა აღემატებოდეს ლითონის ტემპერატურას. თბოგადაცემის ასეთ სურათს ვხვდებით მცირე ტევადობის ღუმელებში, რადგან ამ დროს წილის თხელი ფენაა. დიდი ტევადობის ღუმელებში ასეთი სურათი მიიღება მხოლოდ მაშინ, როცა დნობის ტექნოლოგიური პროცესები მოითხოვენ წილის თხელი ფენის აუცილებლობას (მაგ. უჟანგავი ფოლადების გამოდნობა 80 ტ-მდე ტევადობის ღუმელებში გადადნობით, აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებით). თანამედროვე ზემძლავრ ღუმელებში, სადაც უმთავრესად რიგითი მარკის ფოლადები დნება და ხშირად გამოირიცხება ან მინიმუმამდე დაიყვანება აღდგენითი პერიოდი, სპეციალურად კქმნიან ქაფისმაგვარ წილას, რომ მან დაიცვას ამონაგი რკალისაგან. ქაფისმაგვარი წილები თითქმის მთლიანად ფარავს რკალს. ამის გამო შესაძლებელია ვიმუშაოთ დიდ სიმძლავრეებზე და გაეზარდოს ტრანსფორმატორის გამოყენების კოეფიციენტი;



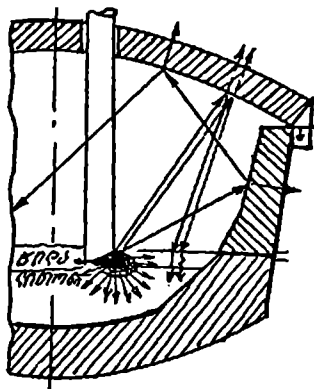
სურ. 5.9. თბოგადაცემის სქემა რკალურ ფოლადსადნობ ღუმელებში ღია რკალით მუშაობისას.

2. რკალის დიდად ეკრანირებისას ანუ, როცა $\frac{D_{ქლ}}{U_{რკ}}$ ან $\frac{D_{ქლ}}{L_{რკ}}$ და

$\frac{\Delta\varphi_{ქლ}}{L_{რკ}}$ შეფარდების მაღალი მნიშვნელობისას ლითონი გადა-

ხურული ადგილებიდან ხურდება თბოგადაცემით. ის წიდა, რომელიც ამ ადგილებიდან დაშორებულია და ამონაგი, სითბოს ღებულობენ ლითონისაგან. ამ შემთხვევაში რკალს დაშორებული წიდა უფრო გრილი იქნება, ვიდრე გამდნარი ლითონი, ხოლო ამონაგის ტემპერატურა – წიდის ტემპერატურაზე ნაკლები. ასეთ სურათს ვღებულობთ წიდის მაღალი ფენის შემთხვევაში, როცა იგი რკალს ფარავს (სურ 5.10).

პირველ შემთხვევაში ამონაგი უშუალოდ ხურდება რკალის მიერ გამოსხივებული ენერგიით. ამონაგი აკუმულირებს (აგროვებს) ამ ენერგიას და შესაძლებელია მოხდეს ისე, რომ ამონაგის მიერ მიღებული სითბო აღემატებოდეს მის მიერ გაცემულ სითბოს. ასეთ შემთხვევაში იგი გადახურდება და შესაძლებელია მწყობრიდანაც გამოვიდეს. ამ თვალსაზრისით მეორე შემთხვევა ამონაგის მედეგობის მიხედვით, უფრო ხელსაყრელია, მაგრამ წიდის შედარებით დაბალი ტემპერატურა ანელებს წიდასა და ლითონს შორის მიმდინარე პროცესებს.



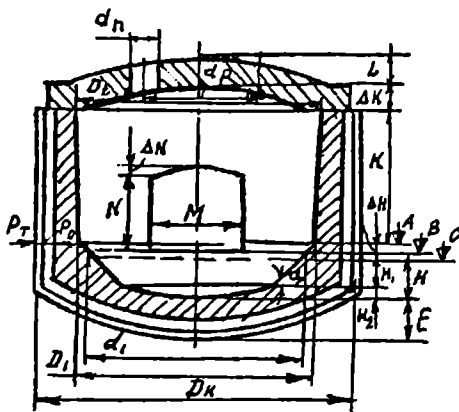
სურ. 5.10. თბოგადაცემის სქემა რკალურ ფოლადსადნობ ღუმელებში წილით დაფარული რკალით მუშაობისას.

5.1.5. ღუმელის სამუშაო სივრცის ზომები

ღუმელის სამუშაო სივრცის ზომების სწორად შერჩევას გადაწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ღუმელის წესიერი მუშაობისათვის. რა იგულისხმება ღუმელის წესიერ მუშაობაში: ეს არის ღუმელის სამუშაო სივრცის ზომების ისეთი შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფდა ღუმელის მაქსიმალურ წარმადობას; თბოდანაკარგების უმცირეს დონეს; ამონაგის მაღალ მედეგობას და მასზე მოსული თბური დატვირთვის თანაბარ განაწილებას; წიდასა და თხევად ლითონს შორის მიმდინარე პროცესებისათვის საჭირო პირობების შექმნას; გადასადნობი კაზმის მთლიანად გადნობის შესაძლებლობას ჯართის ნებისმიერი ნაყარი წონისას. როგორც აქ ჩამოთვლილი სასურველი მოთხოვნებიდან ჩანს, ისინი ხშირად ურთიერთსაწინააღმდეგო შინაარსის არიან. მაგალითად, თბოდანაკარგების შესამცირებლად უმჯობესია ღუმელის საერთო ზედაპირის შემცირება. ხოლო კაზმის მთლიანად ჩატვირთვისათვის ღუმელის სამუშაო სივრცე უნდა გაიზარდოს. ღუმელის მაღალი წარმადობისათვის საჭიროა ღუმელში დიდი სიმძლავრის შეყვანა, ხოლო ეს იწვევს ამონაგის მწყობრიდან სწრაფ გამოსვლას.

ყოველივე ამის გამო, ღუმელის სამუშაო სივრცე ისე უნდა შეირჩეს, რომ შეძლებისამებრ დაკმაყოფილდეს ყველა მოთხოვნა გარკვეულ დონემდე და ერთმანეთთან სასურველად დაკავშირდეს ტექნოლოგიური და თბოგადაცემის პროცესები.

ღუმელის სამუშაო სივრცე იყოფა სამ ძირითად ნაწილად: 1. აბაზანა, 2. თავისუფალი სივრცე და 3. თაღისქვეშა სივრცე (სურ 5.11).



სურ. 5.11. რკალური ფოლადსადნობი ღუმელის სამუშაო სივრცის ფორმა.

აბაზანა ღუმელის ის ნაწილია, სადაც თავს იყრის გამდნარი ლითონი და წიდა. ამიტომ მისი ზომები ისეთი უნდა იყოს, რომ მასში მოთავსდეს გამდნარი ლითონი და წიდა და კიდევ დარჩეს ადგილი ლითონის დუღილისა და არევისათვის (ამ დროს მატულობს ლითონის და წიდის მოცულობა). აბაზანის ფორმა კი ხელს უნდა უწყობდეს დნობის ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების მიმდინარეობას, უნდა უზრუნველყოფდეს უმცირეს თბურ დანაკარგებსა და დნობით გამოწვეული დაზიანებული ადგილების შეკეთების შესაძლებლობას. წიდის რაოდენობა სხვადასხვა ტევადობის ღუმელებში ერთნაირი არ არის. მისი რაოდენობა შეიძლება იცვლებოდეს 15-დან 20 %-მდე. აქედან, უმცირესი მნიშვნელობა შეესაბამება დიდი ტევადობის ღუმელებს, უდიდესი – მცირეს.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, აბაზანის ფორმის შერჩევისას ერთ-ერთი ძირითადი ანგარიშგასაწევი საკითხია თბოდანაკარგების შემცირება. სითბო იკარგება აბაზანის იმ ფართობიდან, სადაც თხევადი ლითონი და წიდა ეხება ამონაგს. იმისათვის, რომ დაიკარგოს სითბოს უმცირესი რაოდენობა აბაზანა უნდა იყოს სფერული ფორმის (სფეროს ყველა გეომეტრიულ ფიგურებიდან გააჩნია ყველაზე მცირე კუთრი ზედაპირი). მაგრამ მთელი აბაზანა სფერული რომ იყოს, მაშინ, მისი ზომების შენარჩუნება ღუმელის

ხანგრძლივი მუშაობისას შეუძლებელი იქნებოდა, რადგან ვერ შეეძლებდით მის შეკეთებას დნობების შემდეგ. ამიტომ, ღუმელის აბაზანას აკეთებენ კონუსურ-სფერულს. კონუსური ნიშნავს, რომ აბაზანის ზედა ნაწილი წარმოადგენს წაკვეთილ კონუსს მიმართულს მცირე ფუძით ქვევით, ხოლო მის შემდეგ აბაზანა სფერულში გადადის. პორიზონტალთან კონუსური ნაწილის დახრილობას 45° -ს იღებენ. ასეთი დახრილობისას შესაძლებელია მაგნეზიტის ფხენილის მიყრა აბაზანის კონუსურ ნაწილზე. იგი ქვევით აღარ ჩაიყრება და იქ მიედგება, სადაც დაიყრება. კონუსის მოცულობა, რომელსაც იკავებს თხევადი ლითონი, C დონით შემოიფარგლება, მის ზემოთ მოთავსებულია თხევადი წიდის დონე, ხოლო მის ზემოთ B დონე, რომელიც სამუშაო ფანჯრის ზღურბლის დონის მაჩვენებელია. ამრიგად, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, წიდის ზედა დონეს და სამუშაო ფანჯრის ზღურბლის დონეს (რომელიც განსაზღვრავს აბაზანის მაქსიმალურ მოცულობას) შორის გათვალისწინებულია დამატებითი მოცულობა იმ შემთხვევისათვის, თუ შემთხვევით ჯართის აწონვისას მოხდა შეცდომა და ჩაიტვირთა უფრო მეტი ანდა შემთხვევით გადმოიყრავდა ღუმელი სამუშაო ფანჯრისაკენ. ამ მოცულობას იღებენ გამდნარი ლითონის მოცულობის $\sim 10\%$ -ის ტოლად. ქვედის ფერდოს დონეს, ღუმელის ტევადობის მიხედვით იღებენ $40-100$ მმ-ით უფრო მაღლა, ვიდრე ზღურბლის B დონეა. ამას იმიტომ აკეთებენ, რომ წიდა არ შეეხოს ღუმელის კედლებს ჩამოსხმისას (როცა ლითონს არ უშვებენ ქვედში გაჭრილი საჩამოსხმო ღარით).

ღუმელის ძირითად ზომებს ანგარიშობენ მისი ნომინალური მოცულებული ტევადობის ანდა, რაც იგივეა, თხევადი ლითონის მასის ($G, \text{ტ}$), მიხედვით. თხევადი ლითონის მოცულობა $V, \text{მ}^3$ ტოლია

$$V = QG, \quad (5.1)$$

სადაც $Q = (0,135-0,145) \text{მ}^3/\text{ტ}$ თხევადი ლითონის კუთრი მოცულობაა.

რადგან აბაზანის მოცულობაში შედის კიდევ წიდის მოცულობა და დამატებითი მოცულობაც, ამიტომ აბაზანის მთლიანი მოცულობა იქნება*

$$V_1 = V + \frac{bG}{c} + eV, \quad (5.2)$$

სადაც $b = 0,05-0,1$ - წიდის მასა ფოლადის მასის წილებში;

$c = 2,8-3$ - თხევადი წიდის სიმკვრივე, $\text{ტ}/\text{მ}^3$;

$e = 0,1-0,15$ - აბაზანის დამატებითი მოცულობა თხევადი ფოლადის მოცულობის წილებში.

* ღუმელის სამუშაო სივრცის ძირითადი ზომების ანგარიში მოყვანილია ა. ნ. სოკოლოვის მიხედვით.

აბაზანის მთლიანი სიმაღლე H მ (სამუშაო ფანჯრის ზღვრუბლის დონემდე) იანგარიშება ემპირიული ფორმულით

$$H = AG^{0.25}, \quad (5.3)$$

სადაც A იცვლება 0,31-დან მცირე ტევადობის ფუჟე ამონაგაიანი ღუმელებისათვის, 0,345-მდე - ყველაზე დიდი ტევადობის ფუჟე ღუმელებისათვის და 0,38 - მუავე ამონაგაიანი ღუმელებისათვის. ეს ტოლობა გამოიყენება იმ ღუმელებისათვის, რომლებშიც $\alpha = 45^\circ$.

აბაზანის სიმაღლე შედგება მისი კონუსური ნაწილის სიმაღლისაგან $H_1 = 0,8H$ და სფერული ნაწილისაგან $H_2 = 0,2H$.

აბაზანის დიამეტრი, სამუშაო ფანჯრის ზღვრუბლის დონეზე, იანგარიშება ტოლობით

$$d_1 = 0,89H + \sqrt{\frac{V_1}{0,71H} - \frac{H^2}{4}} \quad (5.4)$$

სამუშაო არის დიამეტრი (D_1 , მ) გვერდულების (ფერდობის) დონეზე იანგარიშება ტოლობით:

$$D_1 = d_1 + 2\Delta H. \quad (5.5)$$

სადაც $\Delta H = (0,14 - 0,15) 20$ ტ-მდე ტევადობის ღუმელებისათვის და $(0,12 - 0,13)H$ - უფრო დიდებისათვის. H და d_1 სიდიდეები უზრუნველყოფენ თხევად წიდასა და ლითონის შორის მიმდინარე რეაქციების მსვლელობას მათ გამყოფ ზედაპირზე.

ფერდოს დონის ზევით იწყება ღუმელის სამუშაო სივრცე, რომელიც წარმოადგენს მცირე დახრილობის კონუსს. მისი მოცულობა რამდენჯერმე აღემატება აბაზანის მოცულობას, რაც აიხსნება შემდეგი გარემოებით:

1. ღუმელის კამარას მუშაობა უხდება მძიმე ტემპერატურულ და მექანიკურ პირობებში. მისი მუშაობის ხანგრძლივობა, ჩვეულებრივი ტიპის ღუმელებში, ყველაზე მცირეა. ამიტომ, რაც უფრო დაშორებულია იგი თხევადი ლითონის ზედაპირიდან, მით უფრო კარგად იქნება ეკრანირებული ელექტროდებით და მით უფრო დიდხანს იმუშავებს;

2. ცნობილია, რომ ნაყარი ჯართის სიმკვრივე რამდენჯერმე (5-7-ჯერ) უფრო ნაკლებია თხევადი ლითონის სიმკვრივესთან შედარებით. ამიტომ სამუშაო სივრცის მოცულობა უნდა იყოს იმხელა, რომ უზრუნველყოს ჯართის ერთიანი ჩატვირთვა ღუმელში. დნობისას, დამატებითი ჩატვირთვების შემთხვევაში, უარესდება ღუმელის მუშაობის მაჩვენებლები;

3. ამავე დროს, რაც უფრო მაღლა არის თალი, მით უფრო მეტია ღუმელის გარე ზედაპირი და მით უფრო მეტია თბური დანაკარგები. ამასთან, იზრდება ელექტროდების სიგრძე და მათი

გადაადგილების მანძილი. ელექტროდების სიგრძის გაზრდას თან სდევს მათში ელექტრული დანაკარგების ზრდა და, საერთოდ, ღუმელის კონსტრუქციის დამძიმება. ამიტომ, სამუშაო სივრცის სიმაღლის განსაზღვრისას ირჩევენ საშუალო მანქვენებლებს, რომ არც თადი დაიწვას და არც ჩამოთვლილი უარყოფითი მოვლენები გაგზარდოთ. ღუმელის სივრცის საშუალო მანქვენებლებს იღებენ უკვე მომუშავე ღუმელების მუშაობის პრაქტიკიდან.

მაგალითად, ნ. თკორთკოვის [43] მონაცემებით, ღუმელის სამუშაო სივრცის სიმაღლე (ფერდოს დონიდან კამარის ქუსლამდე) უნდა ავიღოთ 0.5–0.6D₁. ღუმელების სამუშაო სივრცის სიმაღლე მერყეობს: 0.5–0.6 მცირე ტევადობისა და 0.38–0.45 – დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის. ა. სოკოლოვი გვთავაზობს სამუშაო სივრცის სიმაღლის გამოთვლის შემდეგ ტოლობას:

$$K=0,75G^{0,25} \quad (5.6)$$

რაც შედარებით უფრო მცირე სიდიდეა.

ღუმელის შიდა დიამეტრი D₂ დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ არის ამოგებული ღუმელის კედლები. თუ აგურით არის ამოგებული ან ცივდება წყლით, მაშინ D₂=D₁, ხოლო თუ კედელი დატკეპნილი ბლოკებით ამოიგება, მაშინ

$$D_2=D_1+2m(K-DH), \quad (5.7)$$

სადაც m=0,07–0,08 20 ტ-მდე ტევადობის ღუმელებისათვის და m=0,06–0,07 – უფრო დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის. თაღის ისარი ΔK ჩვეულებრივ აიღება თაღის დიამეტრის 0,1–0,12 ნაწილის ტოლი.

სამუშაო ფანჯრის ზომები დამოკიდებულია: ჩასატვირთი მანქანების როფებისა და ღუმელის შემკეთებელი მანქანების ზომებზე. გარდა ამისა, სამუშაო ფანჯრიდან შესაძლებელი უნდა იყოს ვაწარმოოთ დაკვირვება ღუმელის კამარის, კედლებისა და ქვედის მდგომარეობაზე.

სამუშაო ფანჯრის სიგანე (M, მ) აიღება

$$M=pD_1, \quad (5.8)$$

სადაც p=0,33 10 ტ-მდე ტევადობის ღუმელებისათვის, 0,26–0,3 – 15-დან 40 ტ-მდე ტევადობის ღუმელებისათვის და 0,22–0,25 – უფრო დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის. სამუშაო ფანჯრის სიმაღლე ტოლია N=(0,65–0,7)M. მისი თაღის ისარი ΔN=(0,13–0,14)M.

ქვედის სისქე (E, მ) ტოლია

$$E=(0,39+0,40)\sqrt{G} \quad (5.9)$$

თუ არსებობს თბოსაზოლოაციო ფენა, მაშინ იგი აიღება 0,1–0,15 მ 0,5 – 5 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის, 0,15–0,17 მ – 3–10 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის, 0,17–0,22 მ – 15–40 ტ ღუმელე-

ბისთვის და 0,22–0,25 მ – უფრო დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის. ქვედის დანარჩენ სისქეზე მოდის ცეცხლგამძლე აგური და ნატკეპნი ფენა.

გარსაცმის $D_{გარ}$ დიამეტრი, ბუნებრივია, უფრო მეტი იქნება სამუშაო არის D_{L} დიამეტრზე. ფერდობის კონსტრუქციის კედლის ამონაგის სისქით, გამრავლებულს ორზე.

$$D_{გარ} = D_1 + 2(P_{ც} + P_{გარ}). \quad (5.10)$$

სადაც $P_{ც}$ – ცეცხლგამძლე ფენის სისქე. მას იღებენ 0,23 მ – 0,5–1,5 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის, 0,30 მ – 3,0–10 ტ ტევადობის, ღუმელებისათვის, 0,35–0,40 მ – 15–40 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის და 0,4–0,45 მ – 40 ტ ტევადობისა და უფრო დიდი ღუმელებისათვის.

$P_{გარ}$ – თბოიზოლაცია. იღებენ 0,1; 0,1–0,15; 0,15–0,2 და 0,2 მ შესაბამისი ტევადობის ღუმელებისათვის.

კამარის სისქეს იღებენ: $L=0,23–0,25$ მ – 10 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის, 0,25–0,3 მ – 15–30 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის და 0,3–0,35 მ 30 ტ-ზე მეტი ტევადობის დიდი ღუმელებისათვის.

კამარაში ამოღებული საელექტროდო ნახერგის დიამეტრი $d_გ$ ოდნავ მეტია ელექტროდის დიამეტრზე $d_{ელ}$

$$d_გ = d_{ელ} + 2\Delta d. \quad (5.11)$$

Δd – დრეჩო ელექტროდისა და კამარაში ამოღებულ ნახერგის შორის. მას იღებენ 0,01 მ თუ ელექტროდის დიამეტრია 0,1–0,3 მ; 0,015-ს – 0,3–0,5 მ დიამეტრის ელექტროდისა და 0,028 მ-ს – 0,5 მ მეტი დიამეტრის ელექტროდისას. ეს მონაცემები ეხება გრაფიტირებულ ელექტროდებს. თუ საქმე გვაქვს ნახშირის ელექტროდებთან ეს სიდიდეები ორმაგდება.

ღუმელის კარგი მუშაობისათვის ძალიან დიდი მნიშვნელობა აქვს ელექტროდების განშლის დიამეტრს $D_{გ}$, ეს არის იმ წრეწირის დიამეტრი, რომელზეც გადის ელექტროდების ღერძები. ელექტროდების განშლის დიამეტრი რამდენიმე ძირითად შესუღღვით უნდა დადგინდეს. ხშირად ეს შესუღღვები ურთიერთგამომრიცხველია. მაგალითად, ელექტროდების განშლის დიამეტრის სიმცირისას (რამდენადაც ეს შესაძლებელია, რადგან ელექტროდის განშლის დიამეტრი დამოკიდებულია ელექტროდების დიამეტრზე; მისი მინიმალური მნიშვნელობა მიიღწევა მაშინ, როცა ელექტროდები ერთმანეთს მიედება), იძულებული ვიქნებოდით შეგვემცირებინა ღუმელის გარსაცმის დიამეტრი. ღუმელის ტევადობის შენარჩუნების შემთხვევაში ეს გამოიწვევდა მისი სიმაღლის გაზრდას. ეს კი, თავის მხრივ, გამოიწვევდა ელექტროდების

დაგრძელებას. მათში ელექტრული წინააღობის გადიდებას და მათი აწვეის (ღუმელის ნატვირთვისას) მანძილის საგრძნობ გაზრდას. ეს კი უკვე უარყოფითი მხარეა. გარდა ამისა, ელექტროდების განშლის დიამეტრის შემცირებისას, ელექტროდებს შორის მოთავსებული კამარის ნაწილი ძალიან თხელი გამოვა. რადგან კამარა მძიმე ტემპერატურულ პირობებში მუშაობს, იქმნება ამ ადგილის ჩამონგრევის მეტი საშიშროება. როგორც ცნობილია, ელექტროდების აწვეა და მასზე დენის მიყვანა ხორციელდება ელექტროდების დამტვრევით. მათ, რასაკვირველია, აქვთ თავისი სისქე ელექტროდების აწვეისა ან დაწვეისას, რადგან ისინი ძალიან მძიმეა, შესაძლებელია აგრეთვე მათი გადახრა ვერტიკალური ღერძის მიმართ და, თუ მათ შორის მანძილი მცირეა, შეიძლება მოხდეს მოკლე ჩართვა (ამიტომ მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის ელექტროდის დამტვრევებს შორის მანძილს იღებენ 100–150 მმ–ს, უფრო მეტი ტევადობის ღუმელებისათვის – 300 მმ–ს).

როგორც ზემოთ თქმულიდან ჩანს, ელექტროდების განშლის დიამეტრის დადგენა თეორიულად ძალიან რთულია. ამიტომ, მის სიდიდეს იღებენ პრაქტიკული მონაცემებიდან, მომუშავე ღუმელების მიხედვით. ელექტროდების განშლის დიამეტრი დამოკიდებულია ელექტროდების დიამეტრზე d და ღუმელის სამუშაო სივრცის დიამეტრზე D , რომელიც აიღება ფერდობის

დონეზე. იღებენ ასეთ შეფარდებებს:
$$\frac{D}{d_{\text{ელ}}} = 2.5 - 3.5;$$
 ამასთან, დიდი

მნიშვნელობები შეესაბამება მცირე ტევადობის ღუმელებს. ბოლო ხანს გამოშვებული მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის ეს შეფარდება ტოლია 3.3–3.5-სა, ხოლო დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის კი – 3.0–3.2-სა. ამავე დროს, ღუმელის კედლების დაშორება რკალისაგან უნდა იყოს ისეთი, რომ თავიდან ავიცილოთ

მწყობრიდან მათი ადრე გამოსვლა. ამიტომ, $\frac{D_1}{D_{\text{გგ}}}$ შეფარდებას

იღებენ 2.5–3.0 მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის და 3.0–3.5 – დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის. ა. სოკოლოვის მიერ შემოთავაზებული ელექტროდების განშლის განმისაზღვრელი ტოლობა ითვალისწინებს როგორც ელექტროდის დიამეტრის მნიშვნელობას, ასევე სამუშაო სივრცის დიამეტრის სიდიდეს

$$D_{\text{გგ}} = q D_1, \quad (5.12)$$

სადაც q არის ელექტროდის დიამეტრზე დამოკიდებული სიდიდე. მისი ფუნქცია. მაგალითად, 0.1–0.3 მ გრაფიტირებული ელექტროდებისათვის $q=0.35$; 0.3–0.5 მ დიამეტრის იგივე ელექტროდებისათვის $q=0.33$ და მათზე მეტი დიამეტრის ელექტროდებისათვის $q=0.3$. ნახშირის ელექტროდებისათვის q -ს იღებენ 15 %-ით მეტს.

ელექტრორკალური ღუმელების კედლების მედეგობა დამოკიდებულია მათზე მოსულ თბურ დატვირთვებზე ანუ რკალის მიერ გამოსხივებულ თბური ნაკადის რაოდენობაზე მოსულს კედლის ერთეულ ფართობზე. სამფაზა ღუმელში თბური დატვირთვის სიდიდე ღუმელის კედლებზე იანგარიშება ტოლობით

$$K = \frac{P_{რკ}}{3} \left(\frac{1}{\ell_1^2} + \frac{1}{\ell_2^2} + \frac{1}{\ell_3^2} \right), \quad (5.13)$$

სადაც K – თბური დატვირთვა, კვტ/მ²;

$P_{რკ}$ – სამივე რკალის საერთო სიმძლავრე, კვტ;

ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 – მანძილი რკალიდან ღუმელის კედლის იმ წერტილამდე, რომლისთვისაც განიხილავრება თბური დატვირთვა, მ.

თბური დატვირთვა უდიდესია ღუმელის კედლის იმ წერტილებში, რომლებიც ყველაზე ახლოსაა ელექტროდთან და უმცირესია იმგენში, რომელიც ყველაზე შორისაა მისგან. K -ს მნიშვნელობა თანამედროვე ღუმელებისათვის შეადგენს 2000–3000 კვტ/მ².

ზემოთ მოყვანილი ანგარიშები არ ეხება თანამედროვე ზემოქლავრ ღუმელებს. აქ გამოიყენება წყლით ან სხვა საშუალებებით საცივებელი პანელები და სხვა კონსტრუქციული სიახლეები, რომლებიც საგრძნობლად ცვლიან ღუმელის მუშაობის მანევრებლებს. ასეთი ღუმელების ზომების ანგარიში მოყვანილი იქნება სათანადო თავში.

რკალური ღუმელების ამონაბი

5.2.1. რკალური ღუმელების ამონაბის მუშაობის თავისებურებანი

ელექტრორკალური ღუმელის ცალკეული ელემენტები ფოლადის დნობისას განიცდის არათანაბარ (განსხვავებულ) თბურ და მექანიკურ დატვირთვებს. ამის გამო, ღუმელის ამოგება ხდება ცეცხლგამძლე მასალებით იმ არათანაბარი დატვირთვების გათვალისწინებით, რომლებსაც ადგილი აქვს ღუმელში დნობის მიმდინარეობისას. ცეცხლგამძლე მასალებით ამოგებისას გამოიყოფენ მის სამ ძირითად ნაწილს: ქველი ფერდოვებით, კედლები და კამარა.

ქველი და ფერდოვები მუშაობენ ძალზე მძიმე პირობებში. მათსე უშუალოდ მოქმედებს თხევადი ლითონი და წიდა (ფერდოვებზე), რის გამოც ისინი ხურდებიან ფოლადის გამოდნობისას 1580–1660 °C ტემპერატურამდე. აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას და მაღალ-ლევირებული ფოლადების გამოდნობისას მისი ტემპერატურა მყისიერად უფრო მაღალ ტემპერატურას აღწევს. ლითონის გამოშვების შემდეგ კი, მასში ტვირთავენ ციფ ჯართს. ე.ი. ქველი და ფერდოვები გადახურების გარდა, კიდევ განიცდიან ტემპერატურის მკვეთრ მერყეობას. გარდა ამისა, ჯართის ღუმელში ჩატვირთვა ჩასატვირთი კალათით ქვედზე ახდენს მექანიკურ დარტყმას. ხშირად კაზმის ცალკეული ნაწილები მასში ერჭობიან კიდევც. თუ კაზმი ღუმელში ცუდად არის განაწილებული (ელექტროდების ქვეშ მოპყვება მსუბუქი ჯართი), მაშინ ელექტროდები სწრაფად აღწევენ ქვედს, მათ აქ არ ხვდებათ საკმაო რაოდენობის გამდნარი ლითონი და ელექტროდების ქვეშ ქვედის ნაწილები შეიძლება ძლიერ გადახურდეს და დაზიანდეს – გაჩნდეს ორმოები ამონაბში. ლითონის დნობის განმავლობაში ფერდოვები დამატებით განიცდიან კიდევ წიდის მოქმედებას. ამიტომ, ყოველი დნობის შემდეგ საჭირო ხდება მათი გულმოდგინე შეკეთება.

ყოველივე ზემოთქმულის გამო, ღუმელის ქველი და ფერდოვები უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მოთხოვნებს: ქვედის ზედაპირი, რომელიც უშუალოდ ეხება თხევად ლითონს, უნდა იყოს მაღალცეცხლმედეგი, თბომედეგი (უძლებდეს დაუმსხვრევლად ტემპერატურულ მკვეთრ ცვლილებებს), კარგად უნდა უძლებდეს

თხევად ლითონისა და წიდის მექანიკურ და ქიმიურ სემოქმედებას. საერთოდ, ქვედი უნდა იყოს საკმაოდ გამძლე მექანიკური სემოქმედებისადმი და გააჩნდეს მაღალი თბური წინააღობა.

ღუმელის კედლები მუშაობს მძიმე ტემპერატურულ პირობებში. ელექტროდებთან ახლოს პირდაპირ განლაგებული ადგილები შეიძლება გადახურდეს კიდევც ამონაგის მასალის თბოგამძლეობის ზღვარზე მაღლა. გარდა ამისა, ღუმელის თაღის ახდისას კაშმის ჩასატვირთად კედლების ტემპერატურა მკვეთრად მცირდება (კედლების გაცივების სინქარემ შეიძლება მიაღწიოს 1000 °C/სთ), რაც ამონაგში ქმნის დიდ თბურ დაძაბულობას. ამიტომ კედლების ამონაგს უნდა ახასიათებდეს მაღალი ცეცხლმედეგობა და თერმომედეგობა, თბური გაფართოების დაბალი და თბოგადაცემის მაღალი კოეფიციენტები, ხოლო კედლების ამონაგი მაღალი თბური წინააღობის შესაძარწუნებლად გარედან კარგად უნდა იყოს თბოიზოლირებული.

კამარა მუშაობს ყველაზე მძიმე პირობებში, რის გამოც მისი მუშაობის ხანგრძლივობა, ღუმელის კედლებთან და განსაკუთრებით ქვედთან შედარებით, მცირეა. კამარაც განიცდის ტემპერატურის მერყეობას დიდ ზღვრებში. ფოლადის დნობისას ის ხურდება როგორც ელექტროდების ქვემოდან გამოთქრილი ელექტრული რკალების ხარჯზე. აგრეთვე კედლებისა და განსაკუთრებით თხევადი წიდიდან ანარეკლი სითბოთი. გარდა ამისა, კამარას უხდება მუშაობა აგრეთვე მძიმე მექანიკურ პირობებში: იგი აგებულია ისე, რომ ცეცხლგამძლე აგურები ძირს არ ვარდება თავიანთი ფორმის გამო (კამარული აგების წესი) და მათზე მოდის დიდი დაწოლა. ამის გამო, კამარის მასალის თბური დეფორმაცია უფრო დაბალ ტემპერატურაზე ხდება. ხოლო, თუ ღუმელი მუშაობს თხელ წიდებზე, რომელთაც თბური არეკვლის უფრო მეტი თვისება აქვთ, შეიძლება ყველაზე ცხელ ადგილებზე კამარამ დნობაც კი დაიწყოს. ამას თან ერთვის ის გარემოებაც, რომ ცხელი აირის ჭავლებს თან სდევს სხვადასხვა შედგენილობის მტვერი, რომელიც ჯდება კამარის შიდა ზედაპირზე, ხშირად შედის მასთან ქიმიურ რეაქციაში და დაბლა სწევს მისი მასალის გამძლეობის ტემპერატურას. ღუმელში კაშმის ჩატვირთვისას კამარა უნდა მოწორდეს ღუმელს. ის გადაეყარება ხოლმე ღუმელის კონსტრუქციების ცივ ნაწილებს და ამიტომ მისი გაცივება ღუმელის კედლებსა და ქვედზე უფრო სწრაფად და უფრო დაბალ ტემპერატურამდე ხდება. ყოველივე ამის გამო, კამარის ამონაგმა უნდა დააკმაყოფილოს შემდეგი მოთხოვნები: ამონაგის მაღალი თბომედეგობა, ცეცხლმედეგობა, ქიმიური მედე-

გობა და თბო- და ელექტროწინაღობა. ეს უკანასკნელი იმიტომ არის საჭირო, რომ ხშირად (თუ ლითონის გამოშვების შემდეგ კარგად არ გაიწმინდა ელექტროდსაჭერსა და კამარას შორის ღრეწო, რომელშიც გროვდება დიდი რაოდენობის ლითონური მტვერი) ხდება მოკლე ჩართვა ფაზებს შორის. წარმოქმნილი რკალი კამარასა და ელექტროდსაჭერს შორის წვაეს როგორც კამარას, ისე ელექტროდსაჭერს, რომელიც ცივდება წყლით. წყლის მოხვედრა ღუმელში კი მასში თხევადი ლითონის არსებობისას ყოველად დაუშვებელია.

5.2.2. ცეცხლგამძლე მასალები

როგორც წინა თავში იყო აღნიშნული, ღუმელის ამონაგი მუშაობს მძიმე ტემპერატურულ პირობებში. გარდა ამისა, მისი ცალკეული ნაწილები: ქვედი ფერდობით, კედლები და კამარა განიცდიან სხვადასხვანაირ ტემპერატურულ და მექანიკურ დატვირთვებს. ამის გამო, ღუმელის ამოსაგებად გამოიყენება სხვადასხვა სახის ცეცხლგამძლე მასალა. სხვადასხვა მასალის გამოყენების აუცილებლობას ისიც უწყობს ხელს, რომ არ არსებობს ისეთი უნივერსალური ცეცხლგამძლე მასალა, რომელიც დააკმაყოფილებდა ყველა იმ პირობას (ხშირად საპირისპიროს), რომლებსაც მოითხოვს რკალურ ღუმელებში მიმდინარე ფოლადის დნობის ტექნოლოგიური პროცესები. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ღუმელის წარმადობა, გამოდნობილი ფოლადის ხარისხი, ტექნოლოგიური პროცესების გარდა, ძლიერ არის დამოკიდებული ამონაგის ხარისხზე. რა თქმა უნდა, ამონაგი დიდ გავლენას ახდენს ფოლადის თვითღირებულებაზეც.

ტექნოლოგიური პროცესების მიხედვით, ღუმელის ამონაგი შეიძლება იყოს მუავე და ფუქე. ეს დამოკიდებულება იმაზე, თუ ამონაგისათვის გამოიყენებული მასალა რა ძირითად უარგეულებს შეიცავს. რადგან რკალის მახლობლად ტემპერატურამ შეიძლება მიაღწიოს რამდენიმე ათას გრადუსს, ამიტომ ღუმელის ამონაგი, რომელიც დაშორებულია რკალიდან (მაგ. კედლები და კამარა, ხოლო რკალს ქვევიდან აშორებს გამდნარი ლითონი) შეიძლება გახსურდეს $\sim 1700^{\circ}\text{C}$ -მდე. ამიტომ როგორც მუავე, ისე ფუქე ამონაგი ისეთი ცეცხლგამძლე უნდა იყოს (ანუ ის ტემპერატურა, რომელზედაც ცეცხლგამძლე მასალა იცვლის ფორმას თავისი სიმძიმის ძალით), რომ ამ ტემპერატურაზე არ მოხდეს მისი დეფორმირება. ცნობილია, რომ ღუმელის ამონაგი, გარდა ტემპე-

რატურული დატვირთვებისა, განიცდის მექანიკურ დატვირთვებსაც. ამის გამო, ცეცხლგამძლე მასალის დასახასიათებლად ეყრდნობიან არა მარტო თავისი სიმძიმის ძალით დეფორმაციის დაწყების მონაცემებს, არამედ იმასაც თუ რა ტემპერატურაზე იწყებს იგი დეფორმაციას დატვირთვისას. ასეთი გამოცდები წარმოებს 2 კგ/სმ² მკუმშავი ძაბვის ქვეშ (ცეცხლგამძლე მასალის გახურებისას. ღუმელის ამონაგი ეხება გამდნარ ლითონს და წიდას. იქ, სადაც ეხება წიდას, ამონაგი განიცდის განსაკუთრებულ ცვეთას (ამონაგი და წიდა ერთმანეთთან ქიმიურად ურთიერთქმედებენ, წარმოქმნიან ადვილდნობად ნაერთებს). ამიტომ, ამონაგი ქიმიურადაც მედვიე უნდა იყოს. ყოველივე ამის გარდა, ცეცხლგამძლე მასალას უნდა გააჩნდეს მაღალი ტემპერატურის დროს დაბალი ელექტროგამტარობა და დაბალი თბოგამტარობა. თითქმის ყველა ცეცხლგამძლე მასალის თბოგამტარობა ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მატულობს (გამონაკლისია მაგნეზიტი და კარბორუნდის ცეცხლგამძლე მასალები).

შეავე ამონაგის დასამზადებლად გამოიყენება კაუმიწის შემცველი ნაერთები: კვარციტი და მისგან დამზადებული მასალები (დინასი). მათში კაუმიწის შემცველობაა 95-97%. დინასის აგურის დამზადებისას შემკერულ მასალად გამოიყენება კირის ხსნარი (2-2,2%) და სხვა ხსნარები.

ფუძე ამონაგის დასამზადებლად ძირითადად გამოიყენება მაგნეზიტი ფხენილი. ხშირად მას ემატება ქრომის ან რკინის ღარიბი მადანი. ფუძე ამონაგის მასალად გამოდგება აგრეთვე დოლომიტი. მაგნეზიტი ფხენილის ხარისხი დამოკიდებულია მის სიწმინდეზე, ზომებსა და გამოწვის ტემპერატურაზე (გამოწვის ხარისხს ამოწმებენ მაგნეზიტი ფხენილის სიმკვრივით).

კამარის ამოგებისათვის გამოიყენება გამომწვარი ქრომაგნეზიტიანი მასალა. იგი მზადდება მაგნეზიტი და ქრომის მადნის ფხენილებისაგან. მათგან დამზადებული ნაკეთობანი უნდა დაიტკეპნოს დიდი წნევის ქვეშ და გამოიწვას მაღალ ტემპერატურაზე (1600 °C). უკანასკნელ ხანს გაჩნდა ახალი ცეცხლგამძლე მასალები, რომლებშიც არეულია გრაფიტიანი ნივთიერებები, თიხამიწის სხვადასხვა ნარევი და სხვა.

კედლების ამოგება ხდება ქრომომაგნეზიტი მასალისაგან. მათი ცეცხლმედგობა არ უნდა იყოს 2000 °C-ზე ნაკლები. ამიტომ, ისინი მზადდებიან შელლობის ტემპერატურამდე გამომწვარი მაგნეზიტიდან.

ქვედისა და ფერდობის ამოგებაზეც იხმარება იგივე მასალა, რაც კედლებისათვის, მაგრამ მათი ცეცხლმედგობა 2000 °C

უნდა აღემატებოდეს. ამას აღწევენ გამოცდის ტემპერატურის ცვლილებით. ღუმელის თბური იზოლაციისათვის გამოიყენება შამოტი. შამოტი კარგი მასალაა, რადგან ახასიათებს დაბალი თბოგამტარობა და მაღალი თბომედრობა. მაგრამ ცეცხლმედეგობა შედარებით დაბალი აქვს (1680–1730 °C). ამიტომ, ქვედის ამოგებისას მას იყენებენ, როგორც საიზოლაციო მასალას და შემდეგ მასზე აწობენ ქრომომაგნეზიტის აგურებს. შამოტის აგურებს ფართოდ იყენებენ ციცხეების ამოგებისათვის. მისი ქიმიური შედგენილობა შემდეგია: დაახლოებით 60 % SiO₂, 35 % Al₂O₃ და დანარჩენი მინარეგები.

ღუმელის ამოგებისას საიზოლაციო მასალად გამოიყენება აგრეთვე აზბესტი და შამოტის ფხვნილი.

5.2.3. რკალური ღუმელის ამოგება

რკალური ღუმელის ცეცხლგამძლე მასალებით ამოგებას იწყებენ ქვედიდან. ქვედის ამონაგი პირობითად იყოფა სამ ფენად: ზედა, დატკეპნილი ფენა, რომელიც პირველი დნობისას შეცხვება მყარ ფენად; აგურების ფენა, რომელიც დატკეპნილი ფენის საყრდენს წარმოადგენს და თბოსაიზოლაციო ფენა. სპეციალური ფოლადების გამოსადნობად, ხანდახან პირველ დატკეპნილ ფენას არ აკეთებენ. მაშინ საჭიროა აგურების ფენის სისქის გაზრდა.

მიღებულია, რომ ქვედის სისქე უნდა იყოს დაახლოებით თხევადი აბაზანის სიღრმის ტოლი. ასე აგებდნენ ღუმელის ქვედს, სანამ არ დაიწყეს თხევადი ლითონის ელექტრომაგნიტური არევა. ელექტრომაგნიტური არევა არის წინ გადადგმული ნაბიჯი ფოლადის დნობაში. ამ დროს ხდება: თხევად წიდასა და ლითონს შორის მიმდინარე პროცესების დაჩქარება; ღუმელში მიცემული მალეგირებელი ელემენტების (ხანდახან მათი რაოდენობა აღწევს ღუმელის ტევადობის 30 %-ს და მეტსაც) სწრაფად არევა; ღუმელიდან წიდის მოხდის გაადვილება (ვინაიდან ლითონის არევა ანუ ტრიალი აბაზანაში შეიძლება ვაწარმოოთ ნებისმიერი მიმართულებით: წრიულად, ღუმელის სამუშაო ფანჯრიდან გამოსაშვებ ღარისაკენ და პირიქით და ა.შ. წიდის მოხდისას თხევად ლითონს ამოძრავებენ გამოსაშვები ღარიდან სამუშაო ფანჯრისაკენ; ლითონს გამოყოფილი წიდა მოედინება სამუშაო ფანჯრისაკენ და ადვილდება მისი მოხდა). ელექტრომაგნიტური არევისათვის გამოიყენებული

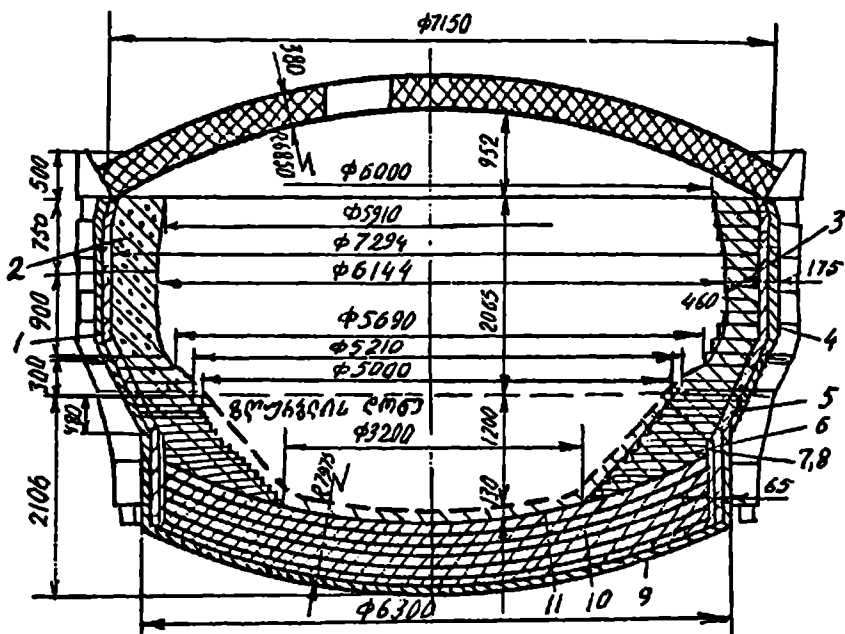
ხელსაწყოები ძალიან ძვირია და იმისათვის, რომ გამოყენების ეფექტიანობა გაიზარდოს. ამცირებენ ღუმელის ქვედის სისქეს. ამ შემთხვევაში გამდნარი ლითონი უფრო ახლოა ლითონის ამრეკვ დანადგართან (იგი ღუმელის ქვეშ იდგმება) და არეკვა უფრო ინტენსიურად ხდება. მაგრამ ქვედის ამონაგის ძლიერი გათხელება არ ეარგა, რადგან იზრდება თხევადი ლითონით ქვედის გარღვევის საშიშროება. ქვედიდან ლითონის გასვლას კი მოჰყვება არა მარტო ლითონების ელექტრომაგნიტური არევის მოწყობილობის გაფუჭება, არამედ ღუმელის სხვა ძირითადი კვანძების დაზიანებაც. ამიტომ, თუ გამოყენებულია თხევადი ლითონის ელექტრომაგნიტური არევის დანადგარი, მაშინ ქვედის სისქე კეთდება აბაზანის სიღრმის 70-80 %.

რასაკვირველია, ქვედის სისქე დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე. ჩვენ განვიხილოთ 100 ტ ტევადობის ფუძემონაგიაში ღუმელის ამოგების მაგალითი.

თუ ასეთი ღუმელი აღჭურვილია ელექტრომაგნიტური ამრეკით, ქვედის სისქეს იღებენ ~800-900 მმ თუ არა, მაშინ - ~1000-1100 მმ.

ღუმელის ქვედს ამზადებენ შემდეგნაირად: ღუმელის ქვედის ლითონურ გარსაცმზე ალაგებენ 9-20 მმ სისქის ფურცლოვან აზბესტს ანდა ყრიან 30-40 მმ-ის სისქის შამოტის ფხენილს. ასეთი ფენა საჭიროა იმისათვის, რომ აგური ზედ კარგად დაეწყოს და შეავსოს ლითონის გარსაცმის ყველა უსწორმასწორობა (მაგ. შენადული ნაკერები). შემდეგ, აზბესტის ფურცელსა ან შამოტის ფხენილის ნაყენებზე (სურ 5.12) ბრტყლად აწყობენ შამოტის აგურებს ორ ფენად. იმისათვის, რომ აგურებს შორის ღრეწოები (ნაკერები) ერთმანეთს არ დაემთხვეს, ყოველი ფენის შემდეგ აგურები ეწყობა 45°-ით შემობრუნებული ქვედა აგურების მიმართ. შემდგომ აწყობენ წიბოებით გვერდებზე მაგნეზიტის აგურებს, დაახლოებით 5-6 ფენას. აგურის შორის ღრეწოებს ავსებენ მაგნეზიტის ფხენილით, რომ უფრო კარგად შეივსოს ღრეწოები, აგურებს ფრთხილად ურტყამენ ხის ჩაქურებს. 5-10 აგურის შემდეგ, ორივე მიმართულებით ტოვებენ 3-4 მმ სისქის ე.წ. თბურ ნაკერებს. ქვედის ამონაგს და გარსაცმის კედლებს შორის ტოვებენ ასევე 70-80 მმ-ის სისქის თბურ ნაკერებს, რომელთაც ავსებენ აზბესტის ფხენილით.

ზედა, დატკეპნილი ანუ სამუშაო ფენა კეთდება 150-300 მმ-ის სისქის, ღუმელის ტევადობის მიხედვით. დატკეპნილი ფენა მაშინ კეთდება მაგნეზიტის ფხენილისაგან, როცა იგი შედარებით უფრო იაფია და ადვილად იშოვება. დასატკეპნი ფენის მასალას ამზადებენ მაგნეზიტის ფხენილისა და ქვანახშირის ფისის ნარევისაგან (ნარევის მასის 10-12 ფისია %). ქვანახშირის



სურ. 5.12. 100 ტ ტევადობის რკალური ლემელის ამონაგის ჰრილი.

ფისი არ უნდა შეიცავდეს ტენს, რისთვისაც მას ადუღებენ 24 საათის განმავლობაში და უმატებენ მისი მასის 10 %-მდე ქვანახშირის ფხენილს. გაცრილ და გასუფთავებულ მაგნეზიტის ფხენილს ახურებენ 80–100 °C-მდე და მასზე ასხამენ გახურებულ ქვანახშირის ფისს. სანამ ამ მომზადებულ მასას დააყრიან ქვედაზე ამოგებულ მაგნეზიტის აგურების ფენას, ეს ფენა უნდა გახურდეს 60–70 °C-მდე. ზედა სამუშაო ფენა იტკეპნება ნაწილ-ნაწილ. ჯერ, დაახლოებით, 25–30 მმ სისქის ფენას დატკეპნიან პნევმატური ჩაქუნებით. შემდგომ კიდევ დააყრიან ფხენილს და ა.შ. დატკეპნას უნდებიან დიდხანს (60–70 საათი). არსებობს ზედა ფენის დატკეპნის სხვა ხერხიც. მაგნეზიტის ფხენილს უმატებენ თხევად მინას (6 %), ახურებენ 50–60 °C-მდე და ტკეპნიან ასევე ფენა-ფენად. მაგნეზიტის ფხენილის ყურაქციული შედგენილობა ამ შემთხვევაში უნდა იყოს: 0,1 მმ-ზე ნაკლები 15–25 %; 3–6 მმ 10–30 % და 6 მმ-ზე მეტი – არა უმეტეს 3 %-ისა. არსებობს ქვედის ზედა ფენის დატკეპნის კიდევ ერთი ხერხი. აყრიან მშრალ მაგნეზიტის ფხენილს პირდაპირ აგურებზე და ტკეპნიან პნევმატური ჩაქუნებით. დატკეპნა ტარდება მანამდე,

სანამ 5 მმ სისქის ლითონის ღერო ხელის დაჭერით ჩავა დატკეპნილი მაგნეზიტის ფხვნილში არა უმეტეს 10 მმ-ის სიღრმეზე. ასეთი ხერხით დატკეპნის ხანგრძლივობა არ აღემატება 6-8 საათს. იმისათვის, რომ ამ გზით დატკეპნილი ქვედი არ დაზიანდეს კაზმის ნატეირთვისას და აგრეთვე იმიტომ, რომ კარგად შეცხვეს ღუმელის სფერულ ნაწილზე, დატკეპნილი ფენის ზევიდან აწყობენ რკინის ფურცლებს და ამის შემდეგ ტეირთავენ კაზმს. ქვედის დატკეპნის ასეთი ხერხის დადებით მხარედ ისიც შეიძლება ჩაითვალოს, რომ ამნაირად დატკეპნილი ქვედის ზედა ფენა არ ანახშირბადიანებს პირველ დნობებს. აბაზანის ამონაგის მედეგობა შეადგენს 1500-5000 დნობას და დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე.

კედლების ამონაგი შედგება ორი ფენისაგან: დამცველი და მუშა. დამცველი ფენა ამოიგება ქრომომაგნეზიტის აგურებით (3) დაახლოებით 115 მმ სისქის. ხაშუშაო ფენის ამოგებას იწყებენ გამოსაშეები ხერელიდან ხაშუშაო ფანჯრისაკენ გადაადგილებით. შემდეგ ორ ფენას აკებენ ფანჯრიდან გამოსაშეებ ხერელამდე და ა.შ. ხშირად ღუმელის კედლებს უკეთებენ თბოსაიზოლაციო ფენას. იგი შედგება 10-15 მმ სისქის ასბესტის ფურცლისაგან ან შამოტის ფხვნილისაგან სისქით 30-40 მმ და შამოტის აგურისაგან. საიზოლაციო ფენის დანიშნულებას წარმოადგენს აგრეთვე გახურებით გამოწვეული გაფართოებისას კედლების მიერ განხორციელებული წნევის შემცირება. ახლა ამისთანა ფენებს აღარ აკეთებენ.

კედლების ამონაგის მედეგობა გაცილებით ნაკლებია. ვიდრე აბაზანის ქვედის მედეგობა. იგი შეადგენს მაგნეზიტის აგურებით ამოგებულ კედლებისათვის 80-200 დნობას. ქვედა ზღვარი შეესაბამება დიდი ტევადობის ღუმელებს. ზედა - მცირე ტევადობის.

ბოლო ხანებში კედლებს ამოაგებენ ე.წ. არმირებული მაგნეზიტის აგურებით. ასეთ აგურებს ოთხივე მხრიდან შემორტყმული აქვთ ფოლადის თხელი ფირფიტები. ფოლადის დნობისას ეს ფირფიტები ხურდება, იყანგება და ავსებს ღრეწოებს აგურებს შორის. რაც ანახლაურებს (კომპენსაციას უკეთებს) აგურების ჩაჯდომას და აკავშირებს მათ ერთმანეთთან.

კამარის ამოგება ხდება მათთვის განკუთვნილ ადგილებზე. თარგის (შაბლონის) გამოყენებით. კამარის რგოლს ამოწმებენ. უპირველეს ყოვლისა, გეომეტრიულობაზე. თაღის რგოლი ცივდება წყლით. ამიტომ მასში უშვებენ წყალს 700-900 კა (7-9 ატ) წნევით დიდი ტევადობის ღუმელის კამარის რგოლისათვის და 600 კა (6 ატ) - მცირე ტევადობის ღუმელის კამარის რგოლისა-

თვის. ადრე კამარის ამოგება ხდებოდა ე.წ. ელექტროდინასით. ეს იმით აიხსნება, რომ დინასს გააჩნია დიდი სიმტკიცე მაღალი ტემპერატურისას და, ამის გარდა, გახურებით უფართოვდება, რაც კამარული წყობისათვის მეტად საჭირო თვისებაა. მაგნეზიტის აგური – პირიქით, გახურებით იკუმშება და შეიძლება კამარა ჩაინგრეს. მაგრამ დინასის შედეგობა მაგნეზიტთან შედარებით იმდენად მცირეა, რომ ამჟამად კამარას მარტო ქრომო-მაგნეზიტის აგურებით ამზადებენ.

ამჟამად მიმდინარეობს მუშაობა ახალი ცეცხლგამძლე მასალების შესაქმნელად, რათა გაიზარდოს ღუმელის ამონაგის შედეგობა და, მაშასადამე, ღუმელის წარმადობაც.

თანამედროვე ზემოქლავრი ღუმელების კედლებისა და კამარის ამოგება განსხვავდება ჩვეულებრივი ღუმელის კედლებისა და კამარის ამოგებისაგან. ამ განსხვავებას განიხილია ვიგნის შესაბამის განყოფილებაში.

თ ა ვ ი III

მექანიკური მოწყობილობა

5.3.1. რკალური ღუმელის მექანიკური მოწყობილობა

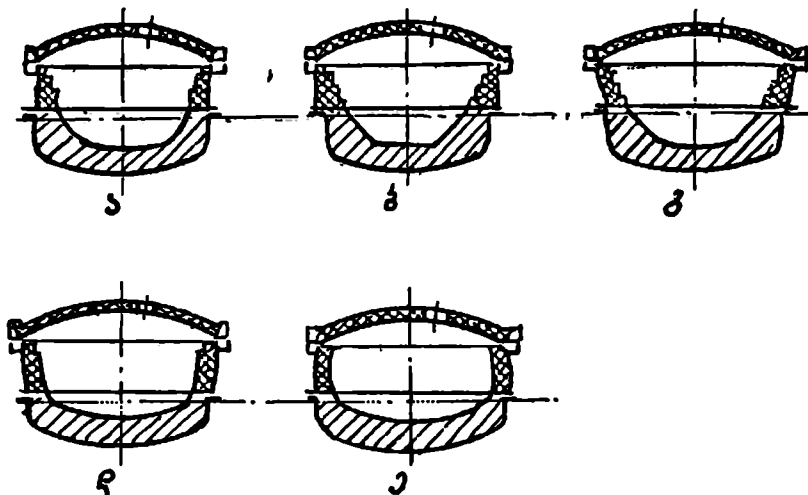
თანამედროვე ელექტრორკალური ღუმელები, ერთი და იგივე ტევადობისაც კი, შესაძლებელია ძალიან განსხვავდებოდეს ერთმანეთისაგან. ამის მიზეზია ღუმელების მექანიკური მოწყობილობა. თუ სადნობი სივრცეები ერთნაირი ტევადობის ღუმელებში თითქმის ერთნაირია, ისინი შეიძლება განსხვავდებოდნენ იმით, რომ ერთ შემთხვევაში ღუმელის კაზმის ჩასატვირთად ღუმელი გამოგორდება სამუშაო ბაქნისკენ უკამაროდ, მეორე შემთხვევაში კამარა გადაადგილდება ან შებრუნდება საჩამოსხმო მალისაკენ. ბუნებრივია, ასეთი ღუმელების საძირკვლები და თვით გადამაადგილებელი მექანიზმები საგრძნობლად განსხვავებული იქნება. ასევე, ერთნაირი ტევადობის ღუმელები განსხვავდება ერთმანეთისაგან კაზმის ჩატვირთვის საშუალებებით. მართალია, ახლა მხოლოდ აქა-იქ შემორჩა ძველი საამქროები, სადაც კაზმის ჩატვირთვა ხდება როფებით სამუშაო ფანჯრიდან, მაგრამ

ჩატვირთვის ასეთი საშუალება მეკეთრად ასხევეებს ასეთ ღუ-
მელს იმ ღუმელებისაგან, რომლებშიც კაზმის ჩატვირთვა ხდება
კალათებით შემოდან. ამრიგად, ღუმელის მოწყობილობა მის
მუშაობის პირობებზე დიდ გავლენას ახდენს. ღუმელის ძირითად
მოწყობილობაში უმთავრესად იგულისხმება:

1. ღუმელის გარსაცმი და კამარის რგოლი;
2. საყრდენი კონსტრუქციები;
3. ღუმელის შემობრუნების და დახრის მექანიზმები;
4. სამუშაო ფანჯრები;
5. ელექტროდის დამტკერები და მათი გადაიმადგილებელი
მექანიზმები;
6. კამარაში ელექტროდებისათვის განკუთვნილი ხერქლების
შემამჭიდროებელი რგოლები;
7. ღუმელის ახდის მოწყობილობები კაზმის სევიდან ჩატ-
ვირთვისათვის;
8. აირების და მტერის გამწოვი მექანიზმები;
9. ელექტრული მოწყობილობა.

5.3.2. ღუმელის გარსაცმი და კამარის რგოლი

ღუმელის გარსაცმი მეტად რთულ თბურ და მექანიკურ
პირობებში მუშაობს. მთელი ამონაგის სიმძიმე მოდის მასზე.
იგი ხურდება 100-150 °C-მდე. მასზე აწყობილია ღუმელის სხე-
დასხვა მექანიზმი და მას ყურდნობა კამარა. ამიტომ, ღუმელის
გარსაცმის ფორმას და დამზადებას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება.
მათ შეიძლება კქონდეთ სხედასხვა მოყვანილობა (სურ 5.13).
რაც დამოკიდებულია ღუმელის ტევეადობასა და მუშაობის
პირობებზე. მაგალითად, ე.წ. კასრისებური, ფორმა „ე“ (სურ. 5.13)
შეიქმნა საშუალო ტევეადობის ღუმელის რეკონსტრუქციისას.
როცა საჭირო გახდა ღუმელის ტევეადობის გასრდა და ამის
საშუალებას არ იძლეოდა ღუმელის კარიბტე (პორტალი) (არ
შეიძლებოდა კამარის დიამეტრის გაზრდა). საერთოდ, გარცმი,
როგორც ეს ჩანს სურათებიდან, შეიძლება იყოს: ცილინდრული,
ზემოთ ოდნავ გაგანიერებული კონუსით; საფეხურიანი, რომლის
ზედა დიამეტრები მეტია ქვედაზე. ასეთი ფორმები უზრუნველ-
ყოფენ შესაბამისად ამონაგის ისეთ განლაგებას, რაც ზრდის
მის მედეგობას. დიდი ტევეადობის ღუმელების გარსაცმი მზად-
დება შემადგენელი ნაწილებისაგან. ღუმელის გარსაცმის კედ-
ლები (სამუშაო ფანჯრის ზღურბლის დონეზე) ედგმება აბაზა-

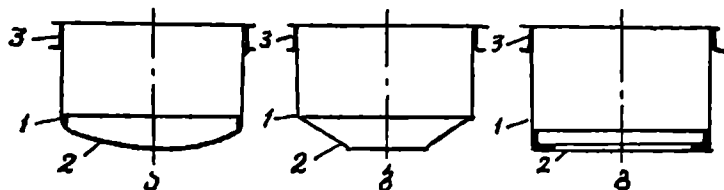


სურ. 5.13. რკალური ელექტროდუმელების გარსაცმის ფორმები:
 ა-ცილინდრული; ბ-საფეხურებიანი; გ-კონუსური;
 დ-ცილინდრულ-კონუსური; ე-კასრისებური;

ნის გარსაცმს და ერთდება მასთან მოქლონებით ან სხვა საშუალებებით. თვით ღუმელის გარსაცმის კედლებიც შეიძლება დამზადდეს ცალკეული ნაწილებისაგან (უმთავრესად ორი) და მათ აერთებენ როგორც ქვედის გარსაცმთან, ისე ერთმანეთთან. ღუმელის გარსაცმის კედლები დახერეტილია 20-30 მმ დიამეტრის ხერელებით. ისინი განკუთვნილია წყლის ორქლის გამოსასულელად ახლად ამოგებული ღუმელის გაშრობისას.

ღუმელის ქვედის გარსაცმიც მზადდება სხვადასხვა სახით (სურ. 5.14): ბრტყელი კონუსური ან ორმაგი კონუსით; კონუსურ-სფერული; სფერული. ქვედის გარსაცმიც მზადდება იმავე მასალისაგან, რისგანაც - გარსაცმის კედლები. იმ შემთხვევაში თუ გამოყენებულია გამდნარი ლითონის ელექტრომაგნიტური არევა, ქვედის ქვედა ნაწილს ამზადებენ უჟანგავი ფოლადისაგან. რადგან ელექტრომაგნიტი თავსდება ღუმელის ქვევით და სტატორის მაგნიტური ნაკადი ქვედში უნდა გავიდეს. ბრტყელი ქვედის დამზადება ყველაზე ადვილია. სამაგიეროდ, მას ყველაზე მეტი უარყოფითი მხარე აქვს. ჯერ ერთი, მან შეიძლება ვერ გაუძლოს ამონაგის სიმძიმეს, თბურ დატვირთვებს ან მისგან გამოწვეულ დეფორმაციებს და გაიღუნოს. ამისათვის საჭიროა ქვედს გაუკეთდეს სიმტკიცის დამატებითი ელემენტები. გარდა ამისა, ასეთი მოყვანილობის ქვედის დამზადებისას იხარჯება მეტი

მასალა, ე.წ. „მკედარი“ ადგილების ამოვსებისათვის. და კიდევ, ქვედის გარსაცმის დიდი ფართობის გამო სითბოს მეტი დანაკარგი გვაქვს.



სურ. 5.14. რკალური ელექტროღუმელების გარსაცმები სხვადასხვა ქვედით; 1- გარსაცმის ცილინდრული ნაწილი; 2-ქვედი; 3 -სიმტკიცის რგოლი.

ზემოთ მოყვანილი მოსაზრებების გამო, ყველაზე მიზანშეწონილი იქნებოდა სფერული ქვედის გარსაცმის დამზადება. მას ექნებოდა დიდი მექანიკური სიმტკიცე, ამონაგის ნაკლები ხარჯი და თბური დანაკარგებიც ნაკლები იქნებოდა. მაგრამ მისი დამზადება, თუ მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის კიდევ შესაძლებელია, დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის თითქმის შეუძლებელია (მოითხოვს ზემოაღვნილებს). ამის გამო, უფრო ხშირად მიმართავენ კონუსურ ან კონუსურ-სფერულ ქვედის გარსაცმის დამზადებას. ამ დროს მიიღება გარსაცმის სასურველი სიმტკიცე, უფრო ნაკლებია ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი, ვიდრე ქვედის ბრტყელი გარსაცმისას და თბური დანაკარგებიც არ იქნება დიდი.

ღუმელის კედლების და ქვედის გარსაცმიც მზადდება ერთი და იგივე მასალისაგან – ფურცლოვანი საქიბებ ფოლადისაგან. გარსაცმის სისქე დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე და შეიძლება იყოს 10-50 მმ (საერთოდ მიღებულია გარსაცმის სისქე ავიღოთ მისი დიამეტრის $1/200$).

თუ ქვედის გარსაცმის სიმტკიცეს უზრუნველყოფს მისი მოყვანილობა, მას აღარ სჭირდება სიმტკიცის ელემენტები. რასაც უსათუოდ უკეთებენ ღუმელის კედლების გარსაცმის მათი (ე.წ. სიმტკიცის რგოლების) სახეები სხვადასხვანაირია და დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე. ზედა სიმტკიცის რგოლი წარმოადგენს აგრეთვე ქვიშის ჩამკეტს. იგი მზადდება ღარიანობის მოყვანილობის. ღარი არის მოქცეული ზედა მხრიდან. მასში იყრება ქვიშა და როცა კამარა ეხურება ღუმელს, მაშინ კამარის რგოლი ჩადის ამ ქვიშაში და ქმნის პერმეტიულობას. მისი სიმტკიცე გადაეცემა ღუმელის გარსაცმს.

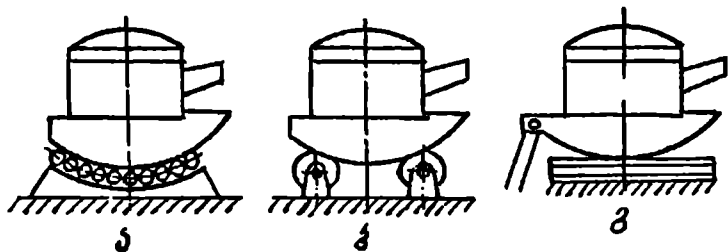
კამარის რგოლში ამოიწყოება (ვეცხლგამიძლე მასაღებო. რგოლში უნდა უსრუნველყოს კამარის მოყვანილობისა და ზომების მუდმივობა მუშაობის მთელ პერიოდში. რგოლი შეიძლება იყოს მთლიანი (ჩამოსხმული ან შედგებულ) ანდა შედგებოდეს ორი-სამი ნაწილისაგან. ამ დროს ისინი ერთმანეთთან შეერთებულია ჭანჭიკებით, რაც ანაზღაურებს კამარის თბურ გაფართოებას.

ჩვეულებრივ, ღუმელს კამარის ორი რგოლი აქვს. როცა ერთი მუშაობაშია, მეორე დევს თარგზე და ხდება მისი ამოგება.

5.3.3. საყრდენი კონსტრუქციები

საყრდენ კონსტრუქციებზე ღუმელის განლაგება დამოკიდებულია მის ტედაობასა და მასში ჩატვირთვის თავისებურებებზე (ღუმელი გამოიწვევა კამარის ქვემოდან თუ პირიქით) (სურ. 5.15 და 5.16).

თუ კაზმი როყებით იტვირთება ღუმელში, მაშინ იგი მაგრდება საყრდენ სექტორებზე (სურ. 5.15ა). თუ ღუმელში კაზმის ჩატვირთვა ზემოდან ხორციელდება, მაშინ ღუმელი მაგრდება საკიდელაზე, ხოლო საკიდელა ეყრდნობა სექტორებს (სურ. 5.15ბ), კარბიჭე შეიძლება დამაგრდეს როგორც საკიდელაზე, ასევე ცალკე სექტორებზე (სურ. 5.15გ) როგორც ირკვევა, ღუმელები, რომლებიც ზემოდან იტვირთება, ერთმანეთისაგან განსხვავდება საყრდენებზე მოთავსების შესაძლებლობებით. ძირითად განმასხვავებელ ნიშნებად ითვლება შემდეგი:



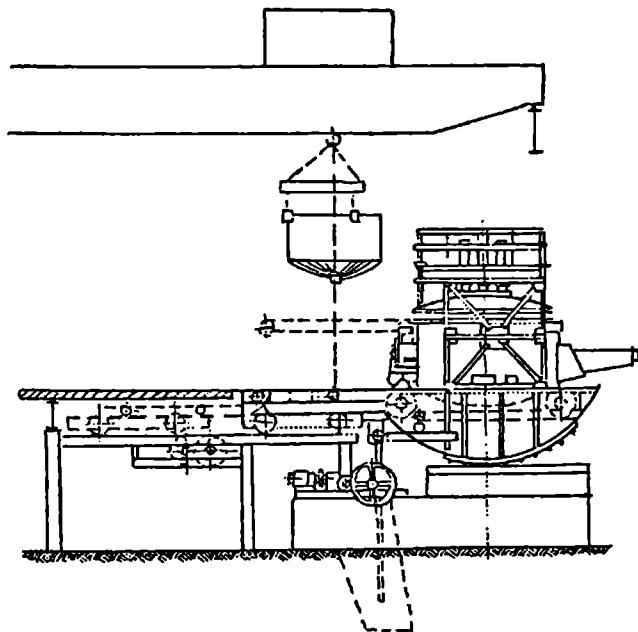
სურ. 5.15. ღუმელის საყრდენის საძირკველზე განლაგების სქემატურ გამოსახულება: ა.ბ-მბრუნავ გორგოლატებზე განლაგებულ სექტორით; გ-საყრდენ სექტორებზე განლაგებით, რომლებიც გადაგორდებიან კორიზონტალურ სადგარზე.

1. ღუმელები, რომლებსაც კაზმის ჩასატვირთად გამოიგონებენ სადნობი მალის სამუშაო ბაქნისკენ. მათი კამარა იწვევა მადლა. კარიბჭეზე მოთავსებული მექანიზმებით და ღუმელი ჰიდრაულიკური ან მექანიკური საშუალებებით გამოგორდება. ამ შემთხვევაში კარიბჭე დაყრდნობილია ორ სექტორზე. ეს სექტორები არ არის მყარად დაკავშირებული იმ სექტორებთან, რომლებზედაც დაყრდნობილია საკიდელა ღუმელთან ერთად;

2. ღუმელები, რომლებშიც კაზმის ჩასატვირთად გამოგორდება კარიბჭე კამარასთან ერთად ან სამუშაო, ან საჩამოსხმო მალისაკენ. ამ შემთხვევაში კარიბჭე დაყრდნობილია ლიანდაგზე, რომელიც მოთავსებულია საკიდელაზე.

3. ღუმელები, რომლებშიც კაზმის ჩატვირთვისათვის კარიბჭე კამარიანად შემობრუნდება ან სამუშაო, ან საჩამოსხმო მალისაკენ შვეული ღერძის გარშემო 90° -მდე. ამ შემთხვევაში კარიბჭე შეიძლება ეყრდნობოდეს როგორც საკიდელას, ასევე შეიძლება ცალკე საყრდენი ჰქონდეს.

უნდა აღინიშნოს, რომ თანამედროვე ღუმელებში კაზმის ჩატვირთვა ხდება ძირითადად საკაზმე კალათებით ზემოდან, კარიბჭის შემობრუნებით თავისი ღერძის გარშემო.



სურ. 5.16. ღუმელი გასაგორებელი ტანით (კორპუსით).

5.3.4. ღუმელის გადახრის და შემობრუნების მექანიზმები

ღუმელის გადახრა სამუშაო და სანამოსხმო მალეებისაკენ საჭიროა ფოლადის დნობის ტექნოლოგიური პროცესების დასაწყარებლად და შესასრულებლად. სანამოსხმო მალისაკენ ღუმელს გადახრიან მზა ლითონის გამოსაშვებად და ზოგჯერ ღუმელის ქვედის და უკანა კედლის ძლიერი დაზიანების შემთხვევაში. რადგან დნობის დამთავრებისას ლითონი ღუმელიდან მთლიანად უნდა იყოს გამოშვებული ამიტომ, ღუმელი იმდენზე უნდა გადაიხაროს, რომ უზრუნველყოს თხევადი ლითონისა და წიდის ბოლომდე გამოშვება (თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელებიდან ლითონის გამოშვების სხვა ხერხებს და მასთან დაკავშირებულ ღუმელის გადახრის ზღვრულ კუთხეს გავეცნობით შესაბამის თავში). ღუმელიდან თხევადი ლითონისა და წიდის გამოსაშვები ხერხი მდებარეობს ფერდობის ოდნავ უფრო მაღლა. უკანა კედელში. იგი ოდნავ უფრო ზევითაა. ვიდრე წიდის დონე. ღუმელის გადახრისას ხერხელიდან უშვებენ წიდას (უნდა ვეცადოთ რაც შეიძლება მთლიანად გამოუშვათ ჯერ წიდა, რადგან თუ ის ღუმელში დარჩება, მაშინ მისი გამოწმენდა ღუმელიდან საკმაოდ რთული საქმეა და კიდევ იმიტომ. რომ ადრეგნითი პერიოდის ბოლოსათვის ღუმელში იქმნება კარგად განჟანგული, მაღალფუძიანი წიდა. რომელიც ლითონზე ადრე გამოშვების შემთხვევაში კარგად აირევა თხევადი ლითონის ჭავლში, რაც საგრძნობლად გაზრდის წიდასა და ლითონს შორის მიმდინარე რეაქციების სიჩქარეს, მათი შეხების ზედაპირის რამდენჯერმე გაზრდის გამო. ეს განსაკუთრებით ეხება გოგირდის განაწილებას თხევადი ლითონისა და წიდას შორის). შემდეგ – თხევად ლითონს. რადგან თხევადი წიდა და ლითონი მთლიანად უნდა გადმოიღვაროს ციციხეში, ამიტომ საჭიროა ღუმელის გარკვეული კუთხით გადახრა. გადახრის კუთხის სიდიდე დამოკიდებულია ფერდობის დახრის კუთხეზე. ფერდობის დახრის კუთხეს იღებენ ~ 45°-ს. ამიტომ, ღუმელიც სანამოსხმო მალისაკენ უნდა გადაიხაროს 40–45°-ით.

ღუმელის სამუშაო ბაქნისკენ გადმოხრას სხვა დანიშნულება აქვს. იგი საჭიროა: დაჟანგვით პერიოდში წიდის სამუშაო ფანჯრის ზღურბლიდან თვითდინებით გადმოსვლისათვის; წიდის მოხდისას; ზოგჯერ როფებით მალეგირებული ნივთიერებების ანუ სხვა მასალების მიწოდებისათვის; ღუმელის დაზიანებული ამონაგის შესაკეთებლად. ჩამოთვლილ მიზეზებს თუ დაეუკვირ-

დებით. ღუმელის სამუშაო ბაქნისაკენ გადმოხრა არ საჭიროებს ისეთივე დახრის კუთხეს, როგორც სანამოსხმო მალისკენ გადახრა. ამ კუთხეს იღებენ 10-20°-ს და დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე.

ღუმელის გადახრის სინქარე სხვადასხვა ღუმელებიდან იმის სხვადასხვაა. იგი შეიძლება მერყეობდეს 0,4-1,5 გრად/წმ ყარგალებში და დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე (დაბალი მნიშვნელობები შეესაბამება მცირე ტევადობის ღუმელებს). რასაკვირველია, ღუმელის გადახრა უნდა მიდიოდეს მდორედ ბიძგების გარეშე. ამასთან, გადახრის მექანიზმებმა უნდა უზრუნველყონ ღუმელის მდგრადობა. სასურველია, რომ სანამოსხმო ღარის წვერმა არ იმოძრაოს ჰორიზონტალურ სიბრტყეში. წინააღმდეგ შემთხვევაში თხევადი ლითონის ჭავლი შეიძლება მოხედეს ციციხვის კედლებს, ჩამორყეხოს ისინი და ლითონი გააჭუჭყიანოს არალითონური ჩანართებით. საერთოდ, ლითონის ჭავლით ციციხვის კედლების ჩარეცხვა შესაძლოა მოხდეს ღუმელიდან ლითონის გამოშვებისას. ეს იმიტომ, რომ ლითონის გამოსაშვებად ღუმელის ევრტიკალურ სიბრტყეში დახრისას სანამოსხმო ღარის წვერი მრუდს შემოხაზავს და ჭავლიც მიმართულებას შეიცვლის. ამიტომ (ციციხვი პიკლით ამწეზე და ოსტატის ბრძანების მიხედვით, ამწის მექანიქანე მას გადაადგილებს ევრტიკალური და ჰორიზონტალური მიმართულებებით.

ღუმელიდან ლითონის გამოშვებას ან სამუშაო ყანჯრისა და წილის გადმოსვლას, ბუნებრივია, თან სდევს ნაპერწკლებისა და შხეფების გამოხსროლა. ამიტომ, გადასახრელო მექანიზმები დაცული უნდა იყოს მათგან.

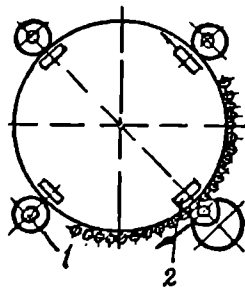
არსებობს ღუმელის გადახრის მექანიზმების ორი სახე: გვერდითი და ქვედა. ორივე მექანიზმს გააჩნია როგორც დედებითი, ისე უარყოფითი მხარეები. გვერდითი მექანიზმებიანი ღუმელი ძალიან ზუსტად და მყარად უნდა იყოს ჩამაგრებული საკიდელაზე და მისი საშუალებით - საძირკველზე. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ღუმელმა შეიძლება შემობრუნება დაიწყოს თავისი შვეული ღერძის გარშემო. გარდა ამისა, ღუმელის გარსაცმზე მოქმედებს დიდი მგრეხაეი დატვირთვები. რის გამოც უიანდება მისი სიმტკიცის რგოლები. ეს მოვლენები უფრო საგრძობი ხდება ღუმელის ტევადობის გაზრდისას. ამიტომ, ასეთ გადასხრელ მექანიზმებს აკეთებენ მცირე ტევადობის ღუმელებზე (5-ტონიანამდე). ამ მოვლენების თავიდან ასაცილებლად ღუმელებს გვერდით გადასახრელ მექანიზმს უკეთებენ ორი მხრიდან.

დადებით მხარედ შეიძლება ჩაითვალოს ის გარემოება, როცა იგი მოთავესებულია ღუმელის გვერდით და ლითონის მიერ ქვედის გარღვევის შემთხვევაში არ ზიანდება.

ქვედა გადასახრელი მექანიზმები უფრო მოსახერხებელია ღუმელის გადახრისათვის, მაგრამ ლითონის ქვედიდან გაპარვისას იგი უსათუოდ დაზიანდება. თანამედროვე დიდი ტევადობის ღუმელები აღჭურვილნი არიან ქვედა გადასაადგილებელი მექანიკური ან ჰიდრაულიკური მექანიზმებით. ჰიდრაულიკური მექანიზმით მუშაობა უფრო იოლია, ვიდრე მექანიკურით, თუმცა როული დასამზადებელია. გარდა ამისა, ჰიდრაულიკური მექანიზმით უსაფრთხო მუშაობისათვის საჭიროა არააალებადი ზეთი, რადგან ამ მექანიზმის ცალკეული ნაწილების შეერთების ადგილები იხეხება, ცვდება და ზეთი გამოსდის გარეთ. აალებადი ზეთის გამოსვლა კი ცეცხლის განენის შესაძლებლობას იწვევს. ძნელად აალებადი ზეთების შექმნისა და გაუჯობესებული ტუმბოების დამზადების გამო, ამჟამად უპირატესად იყენებენ ჰიდრაულიკურ გადასახრელ მექანიზმებს.

შემობრუნების მექანიზმების დანიშნულებაა ღუმელის შემობრუნება ვერტიკალური ღერძის მიმართ ~ 40°-ით კაშმის გადნობის პერიოდში. როგორც ცნობილია, ელექტროდები კაშში ჩაადნობს სამ ჭას და მიაღწევს ქვედს. აქ მათ ხედაბათ ჭების ადგილას ჩამდნარი ლითონი. თუ კაშმი მსუბუქი და ადვილდნობადია (ბურბუშელა), მაშინ ელექტროდი უფრო ადრე აღწევს ქვედს, ვიდრე იქ საკმარისი რაოდენობის თხევადი ლითონი დახვდება იმისათვის, რომ ქვედი არ დააზიანოს. ასეთ ვითარებაში მიზანშეწონილად მიაჩნიათ ღუმელის შემობრუნება ჯერ ერთ, შემდეგ კი მეორე მხარეს და ასე 9 ჭის ჩაადნობა. ეს უზრუნველყოფს თხევადი ლითონის საკმარის რაოდენობას ელექტროდების ქვედთან მიახლოებისას და აგრეთვე „მკვდარი“ ადგილებისა და „ნაღვენთების“ შემცირებას.

აღსანიშნავია, რომ ამ ხერხის გამოყენებამ მცირე და საშუალო ტევადობის ღუმელებზე სათანადო შედეგი ვერ გამოიღო, რადგან ელექტროდების აწევას, ღუმელის შემობრუნებას (0.17 გრად/წმ სიჩქარით) სჭირდება დრო, ლითონი ასწრებს შეცივებას და გადნობის პერიოდი იზრდება. ამიტომ ასეთი ტევადობის ღუმელებზე შემობრუნების მექანიზმებით არ სარგებლობენ (სურ. 5.17). რაც შეეხება ზემოაღვრულ ღუმელებს იქ არც „მკვდარი“ ადგილებია შესამჩნევი და არც „ნაღვენთები“. ხოლო რკალი ისეთი სიმძლავრისაა, რომ პირველი 3 ჭის ჩაადნობის შემდეგ ელექტროდებს იმდენი გამდნარი ლითონი ხვდება ქვედზე, რომ ის არ ფუჭდება.



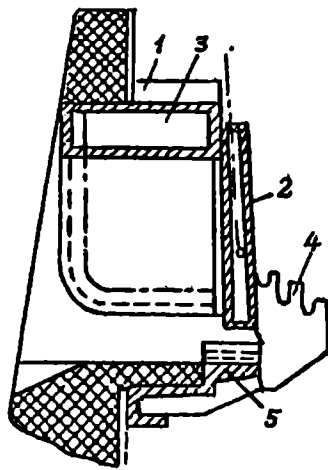
სურ. 5.17. ღუმელის შემოსაბრუნებელი მექანიზმის სქემატური გამოსახულება: 1—საბჯენი გორგოლაკები; 2—საყრდენი გორგოლაკები.

5.3.5. სამუშაო ფანჯრები

ყველა ღუმელის გარსაცმში ამოჭრილია 2–3 ნახერეტი. ერთი აუცილებლად ღითონის გამოსაშვებად, ხოლო ერთი ახორ—სამუშაო ფანჯრისათვის. აქედან ერთი ფანჯარა, თუ ღუმელს მეტი არ აქვს, მოთავსებულია ზუსტად ხანამოსხმო ხერვლის პირდაპირ. ხანამოსხმო ხერვლი გადის ხანამოსხმო მალისკენ. სამუშაო ფანჯარა — სამუშაო ბაქნისკენ. დიდი ტევადობის ღუმელებს ხშირად უკეთებენ მეორე ფანჯარასაც, რომელიც ძირითადი ფანჯრიდან 90°-ით არის დაძრული და იმყოფება ელექტროდების დამჭერების საპირისპირო მხარეს.

სამუშაო ფანჯარა (სურ 5.18) ისეთი ზომის უნდა იყოს, რომ ღუმელიდან ღითონის გამოშვების შემდეგ მოხერხდეს კამარის, კედლების; ფერდობების კარგი დათვალეირება და შეკეთება. მისი საშუალებით შესაძლებელი უნდა იყოს როფებით სხვადასხვა მასალების შეტანა ღუმელში და ა.შ. სამუშაო ფანჯრის ზომებს დაახლოებით იღებენ: სიგანე — ღუმელის სამუშაო დიამეტრის 0,25 და სიმაღლე — ფანჯრის სიგანის 0,8 წილები შესაბამისად.

სამუშაო ფანჯრის ხერვლს გარშემო უკეთებენ ჩამოსხმიულ ჩარჩოს, რომელშიც შესაძლებელია გამაცივებელი წყლის მოძრაობა. ამ ჩარჩოს მიმმართველები ოდნავ დახრილია, მასზე ზემოდან ქვევით და პირიქით სრიალებს ფანჯრის კარები. დახრა იმიტომ არის საჭირო, რომ კარები თავისი სიმძიმით მჭიდროდ ეხურებოდეს ფანჯარას. კარები შიგნიდან ამოგებულია ცეცხლგამძლე მასალით. ფანჯრის კარები მოძრაობს ამწე მექანიზმით. მცირე ტევადობის ღუმელების ფანჯრების კარებები



სურ. 5.18. საშუალო ფანჯრის კონსტრუქცია: 1-ჩარჩო; 2-წყლით საცივებელი კარი; 3-ფანჯრის წყლით საცივებელი თალი; 4-საფარცხელა; 5-ზღურბლის თუჯის ფილა.

იღება საპირწონე მოწყობილობებით. ფანჯრის ჩარჩოს ქვემოთ კეთდება რაფა, რომელზედაც იყრება ცეცხლგამძლე მასალა და იქმნება ზღურბლი.

5.3.6. ელექტროდის დამჭერები და მათი გადამაადგილებელი მექანიზმები

ელექტროდის დამჭერების დანიშნულებაა ელექტროდების დაკავება მოჭერით და მათზე დენის მიყვანა. დიდი ტევადობის ღუმელების ელექტროდების წონა 2-3 ტონამდეა. თანაც თუ გავითვალისწინებთ, რომ გრავიტისა და ლითონის შორის ხახუნის კოეფიციენტი ძალიან მცირეა (0.15), მაშინ მივიღებთ, რომ მომჭერი ძალა 7-7,5-ჯერ უფრო მეტი უნდა იყოს, ელექტროდის წონასთან შედარებით. ელექტროდების დამჭერებს მეტად მძიმე თბურ პირობებში უხდებიათ მუშაობა, რადგან მათზე მოქმედებენ: ელექტროდებსა და კამარას შორის დარჩენილი ღრეჩოებიდან ამომავალი ცხელი აირები; თბური ნაკადი, რომელიც გადაადგილდება ქვევიდან ზევით ელექტროდების გასწვრივ; სიობო, რომელიც გამოიყოფა თვით ელექტროდში მასში დენის გაელის შემდეგ. გარდა ამისა, ელექტროდების დამჭერის მომჭერებსა

და ელექტროდს შორის უნდა იყოს მცირე საკონტაქტო წინა-
ღობა. ეს საჭიროა არა მარტო იმისათვის, რომ ელექტრული
ენერჯიის მცირე დანაკარგები გვექონდეს, არამედ იმიტომაც,
რომ მომჭერი არ გადახურდეს.

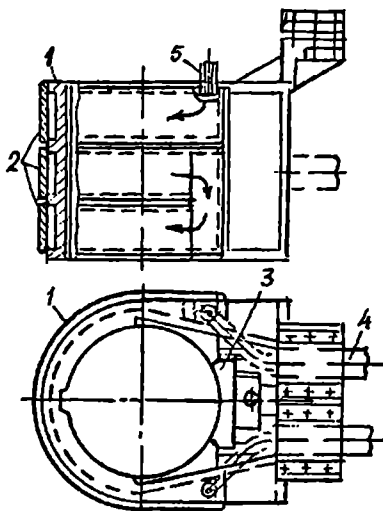
ამრიგად, ელექტროდების დამჭერებს წაეყენებათ მათი მუშა-
ობის პირობებისათვის დამახასიათებელი მოთხოვნები: ელექტ-
როდის დამჭერს და ელექტროდს შორის ურთიერთშეხების
ადგილას ელექტროენერჯიის დანაკარგები უნდა იყოს უმცირესი
და ელექტროდის დამჭერი უნდა იყოს მექანიკურად საკმაოდ
მტკიცე და გამძლე.

კონტაქტური წინაღობა დამოკიდებულია საკონტაქტო ძალა-
ზე (წნევაზე). რაც მაღალია საკონტაქტო ძალა (წნევა). მით
მცირეა კონტაქტური წინაღობა. გარდა ამისა, კონტაქტურ წინა-
ღობაზე დიდ გავლენას ახდენს საკონტაქტო მასალები და ამ
მასალების ზედაპირების მდგომარეობა. რადგან საკონტაქტო
წინაღობას ამცირებს საკონტაქტო ძალა, ცდილობენ მის მაქსი-
მალურ გაზრდას (საკონტაქტო მასალების თვისებების გათვა-
ლისწინებით). მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის საკმარისი
ძალაა 10-15 კნ. დიდი ტევადობის ღუმელებისათვის ეს ძალა
უკვე საკმარისი არ არის და მას ირჩევენ ელექტროდის მასის
მიხედვით.

ნახშირის ელექტროდებთან შედარებით გრაფიტის ელექტრო-
დებისათვის კონტაქტური წინაღობა რამდენჯერმე ნაკლებია.
ამის გარდა, გრაფიტი-ბრინჯაოს და ნახშირი-ბრინჯაოს
კონტაქტური წინაღობა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ფო-
ლადი-გრაფიტის ან ფოლადი-ნახშირისა. ამის გამო, ბრინჯაოც
და სპილენძიც კარგ კონტაქტურ მასალებად ითვლება, ოღონდ
იმ პირობით თუ მათი საკონტაქტო ზედაპირი სუფთაა ჟანგი-
საგან. წინააღმდეგ შემთხვევაში ჟანგის ფენა სრდის კონტაქტურ
წინაღობას და ელექტროდის დამჭერის საკონტაქტო ნაწილი
შეიძლება გახურდეს გაწითლებამდე. ღუმელიდან და ელექტრო-
დებიდან გადაცემული სითბოთი გახურება ხელს უწყობს ბრინ-
ჯაოსა და სპილენძის დაუჩანგვას. ასე რომ არ მოხდეს ბრინჯაოს
და სპილენძის საკონტაქტო ნაწილებს წყლით აცვივებენ.
ფოლადის ელექტროდების დამჭერებს წყლით გაცივება არ
სჭირდებათ, რადგან მათი საკონტაქტო ზედაპირების დაუჩანგვით
კონტაქტური წინაღობა ძალიან არ იცვლება. წყლით გაუცი-
ვებელი ელექტროდების დამჭერების მუშაობის ხანგრძლივობა
0,5-1 წელიწადია, წყლით საცვივებელისა - რამდენიმე წელიწადი.
ყველა ელექტროდის დამჭერი ამჟამად წყლით საცვივებელი
კეთდება.

ელექტროდის დამჭერი შედგება: თავის, მომჭერების, მხრების, ურიკის ან ტელესკოპური დგარის და მეორადი დენგამტარის მყარი ნაწილისაგან.

ელექტროდის დამჭერის თავები (სურ 5.19) მძიმე პირობებში მუშაობენ. დიდი ტევადობის ღუმელებში, სადაც დენის ძალა ~ 60-80 კა-ს აღწევს, შექმნილი მაგნიტური ნაკადები იწვევენ ელექტროდების დამჭერების გადახურებას. ამიტომ ელექტროდების დამჭერების თავებს ამზადებენ არამაგნიტური რკინისაგან და იმ ადგილებზე, სადაც ისინი ეხებიან ელექტროდებს, ადუღებენ სპილენძს ან ბრინჯაოს (მათ შორის კონტაქტური წინაღობა პრაქტიკულად ნულის ტოლია).

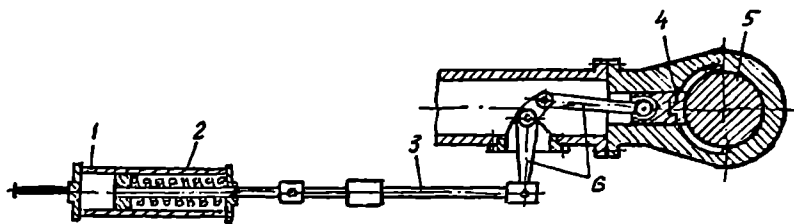


სურ. 5.19. ელექტროდის წყლით საცივებელი დამჭერის თავი; 1-უქანავი ფოლადის ცალული; 2 - წყლით საცივებელი პერანგი; 3-მიმჭერი ფილა; 4-დენმიმცემის მიღები; 5-წყლის მისაყვანი მილყელი.

მომჭერები (სურ 5.20) ძირითადად მზადდება სამბარა-პნე-მატური.

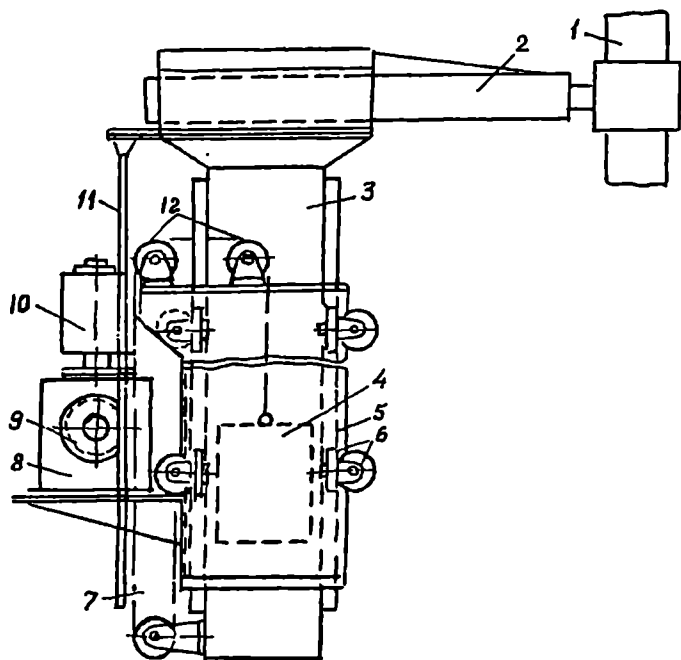
ელექტროდის დამჭერების თავები მაგრდება პორიზირებული მხრებზე, რომელზედაც მოდის მოელი დატვირთვა. ამიტომ ისინი მზადდება ან მსხვილკედლიანი მიღებისაგან და უკეთდება სიმტკიცის დამატებითი წიბოები ან ლითონის ოთხკუთხა კოჭები.

მხრები, თავის მხრივ, უერთდება ურიკას, რომელიც მოძრაობს ან უძრავ, ან განსაკუთრებულ მოძრავე დგარზე. მხრები

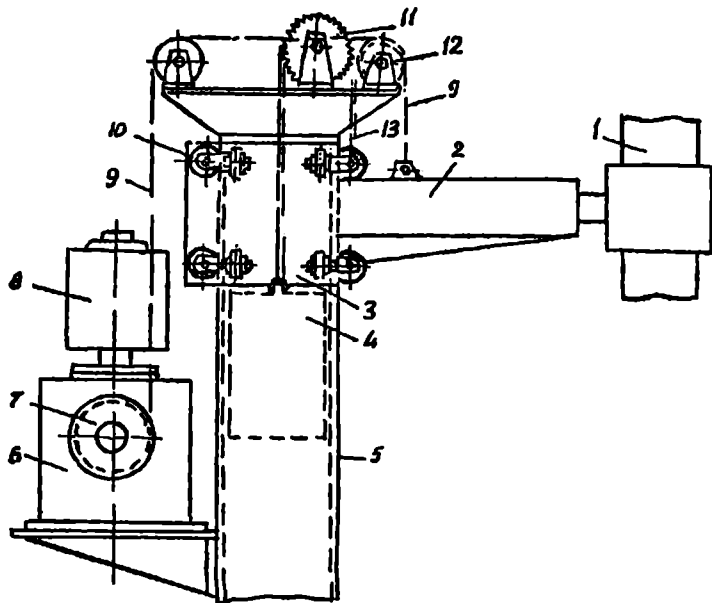


სურ. 520. ელექტროდსაკერის ზამბარა-ანეგმატური მომჭერი; 1-ცილინდრი; 2-ზამბარა; 3-ღვეწის ჭოკი; 4-მომჭერი ხუნდი; 5-ცალკული; 6-ბერეკეტის სისტემა.

და ურიკა ქმნიან Γ-მაგვარ კონსტრუქციას, რომელიც მოძრაობს შვეულად ზევით და ქვევით დგარის შიგნით. ასეთ კონსტრუქციას უწოდებენ ტელესკოპურ დგარს (სურ 521 და 522).



სურ. 521. მოქნილკაეშირიანი ურიკას საკიდრის სქემა; 1- ელექტროდი; 2-სახელო; 3-ურიკა; 4-საპირწონე; 5-უძრავი დგარი; 6-რედუქტორი; 7-დოლი; 8-ელექტროძრავი; 9-ურიკას მიმართველი; 10-ვარსკელავა; 11-გოგონაქი; 12-დრეკადი ჯაჭვი.



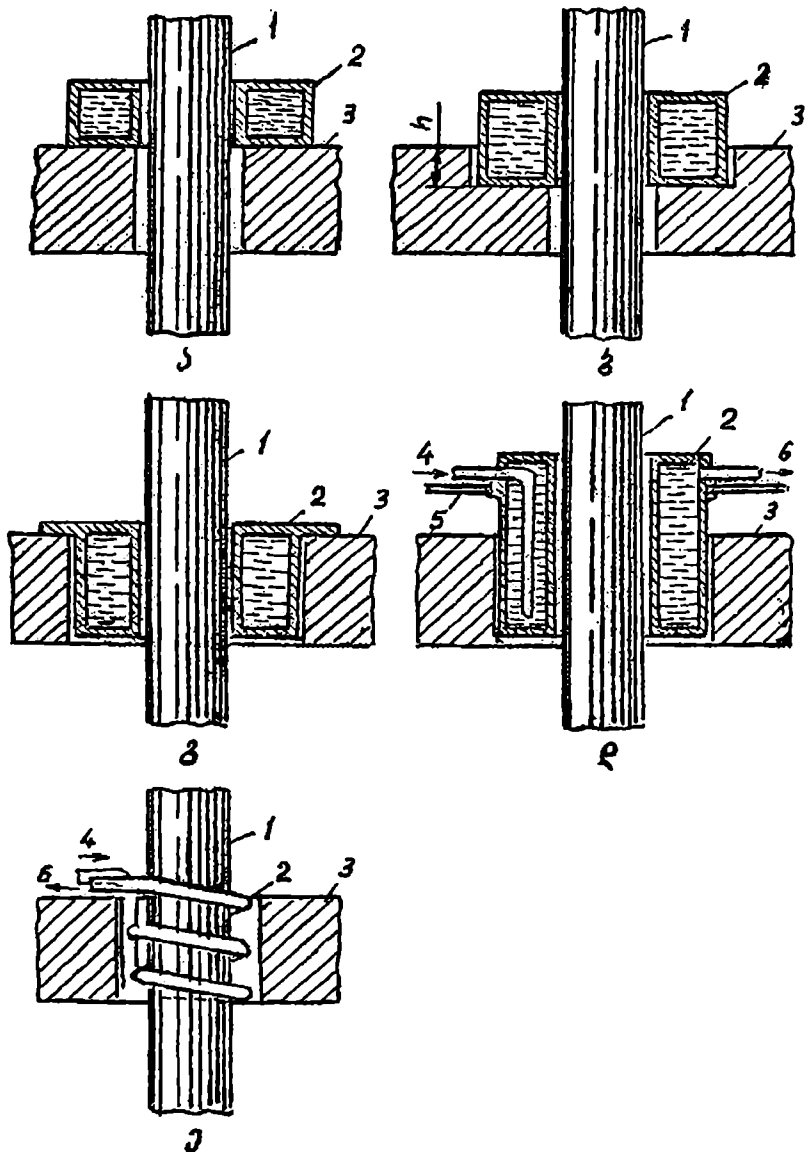
სურ. 522. ლარტყელამძრავიანი ტელესკოპური დგარის საკიდრის სქემა: 1-ელექტროდი; 2-სახელო; 3-მოდრავი დგარი; 4-საპირწონე; 5-უძრავი დგარი; 6-ძიმმართეული გორგოლატები; 7-ბაჯირი; 8-რედუქტორი; 9-კბილანა; 10-ელექტროძრავი; 11-კბილანური ლარტყა; 12-ტოტონაქები.

5.3.7. ელექტროდებისათვის კამარაში განკუთვნილი შემამჭიდროებელი რგოლები

როგორც უკვე იყო აღნიშნული, კამარაში ეკოდება 3 ხერეული ელექტროდების ჩასაშვებად. ელექტროდები საკმაოდ მძიმე და გრძელია (რამდენიმე ელექტროდი გადაებმება ერთმანეთს ნიპელის საშუალებით და სიგრძემ შეიძლება მიაღწიოს 5-9 მ-მდე), რის გამოც შესაძლებელია არ მოხდეს მათი აბსოლუტური შეეული დამაგრება. ამიტომ კამერაში ამოღებული ხერელები ეკთდება ოდნავ (20-40 მმ-ით) განიერი ელექტროდის დიამეტრთან შედარებით. კამარასა და ელექტროდს შორის დარჩენილ ღრეჩოებიდან ამოდის გახურებული აირები, რომლებსაც თან მოხდევს კირისა და ჟანგეულების მტვერი. ცხელი აირები ახურებს ელექტროდების ღუმელის გარე მკოფ ნაწილებს მაღალ ტემპერატურებამდე (>500 °C), რაც იწვევს მათი ელექტრული წინააღობის გაზრდას. გარდა ამისა, გახურებული ელექტროდები

აღვილად იჟანგება ქაერის ჟანგბადით, მცირდება მათი განიჟ-
კეთი და ამიტომ იზრდება ელექტროდის განიჟეთის ერთეულ
ფართობზე მოსული დენის ძალის სიდიდე, რაც დამატებით
ახურებს ელექტროდს. ღრეწოებიდან გამოსულ აირებს თან მი-
აქვს საკმაოდ დიდი რაოდენობის სითბო (ნ. ვ. ოკოროკოვის
მონაცემებით, 30 ტ-ის ტევადობის ღუმელიდან, რომელსაც ძველი
კონსტრუქციის კლაკნილა ჰქონდა ელექტროდების გასაცვივებლად
და ღრეწობის ამოსავსებად, თბური დანაკარგები დნობაზე იყო
1888 კვტ.სთ, ანუ წელიწადში 345 სამუშაო დღისა და დღე-ღამეში
3,5 დნობის ჩატარებისას, წლიურმა დანაკარგმა შეადგინა 2,5 გვტ.სთ).
ღრეწოებიდან ამოსული მტვერი ჯდება კამარის ხერელების
კედლებზე, შედის რეაქციაში კამარის ამონაგთან და ასიანებს
მას. ყოველივე ამის გარდა, ღრეწოებიდან დიდი რაოდენობის ცხელი
აირების გამოსვლა იწვევს ღუმელის სამუშაო ფანჯრიდან ჰაერისა
და მასთან ერთად ჟანგბადის შეწოვას. ეს მოვლენა კი მეტად
არასასურველია აღგენითი პერიოდისათვის, რადგან მან შეიძლება
დამჟანგველი ატმოსფერო შექმნას ღუმელში, რადგან ელექტრო-
დების ღირებულებას საკმაოდ საგრძნობი ადგილი უკავია ლითონის
გადასამუშავებელ ხარჯებში (~30 %) და უარყოფითად მოქმედებს
დნობის ტექნოლოგიურ პროცესებზეც, ამიტომ ხეშოთ მოყვანილი
უარყოფითი მოვლენების გავლენის შემცირებას საკმაოდ დიდი
ყურადღება ექცევა.

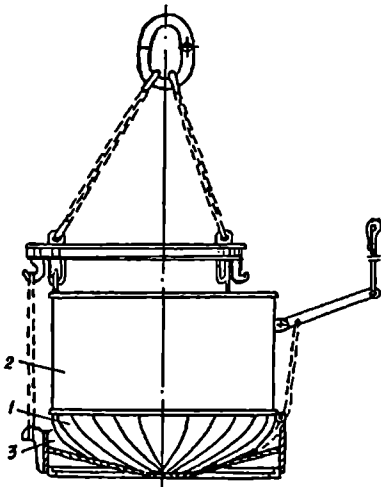
ელექტროდებსა და კამარას შორის ღრეწობის ამოსავსებად
გამოიყენება შემამჟიდრობელი რგოლები ანუ ეკონომიზერები
(სურ. 5.23). რგოლები მრავალნაირი შეიძლება იყოს. ყველაზე
უბრალო წარმოადგენს თუჯის ან ფოლადის ღრუტანიან რგოლს,
რომელიც რადიალურად არის გაჭრილი (რომ არ შეიქმნას
შეკრული მაგნიტური კონტური ელექტროდის გარშემო). ასეთი
რგოლი კამარაზე ხეშოდან თავსდება. წყალი ერთი მხრიდან
შედის და მეორედან გამოდის. რადგან რგოლი მჟიდროდ არ ზის
კამარაში, ამიტომ ღრეწო ელექტროდსა და მას შორის უფრო
მცირეა (5-10 მმ), ვიდრე - კამარასა და ელექტროდებს შორის.
რასაკვირველია ასეთი ღრეწოს არსებობაც არ არის სასურველი
და რგოლებს ამზადებენ ხეშით გაგანიერებული წაკეთილი
კონუსის სახით, ამ გაგანიერებაში ყრიან აზბესტს ან მინის
ბამბას. ამ გზით კარგად ხერხდება ღრეწობის ამოსება. ბოლო
ხანებში რგოლს იმგეარს ამზადებენ, რომ ის სანახევროდ ან
მთლიანად ჯდება თაღში. ამ შემთხვევაში მის დადებით მხა-
რებებს ემატება ისიც, რომ იგი ხელს უწყობს კამარის ყველაზე
გადახურებული ნაწილის ნაწილობრივ გაცვივებას.



სურ. 523. შემაპკიდრობელი რგოლების (ეკონომიზური) დაყენების ვარიანტები: 1-ელექტროდი; 2-შემაპკიდრობელი რგოლი; 3-კამარის ამონაგი; 4-წელის შემოძვევანი მილი; 5-საჯრდენი კონსტრუქცია; 6-წყალგამყვანი მილი.

5.3.8. ღუმელების კამარის ასახდელი მოწყობილობები კაზმის ზემოდან ჩატვირთვისათვის

კაზმის ჩატვირთვის ხერხის მიხედვით, ღუმელები იყოფა ორ ჯგუფად: ხელით ან როფებით ჩასატვირთი და ზემოდან ჩასატვირთი (ჩასატვირთი კალათების გამოყენებით). პირველი ხერხით ჩატვირთვა ხდებოდა ელექტროღუმელების გამოყენების საწყის პერიოდში. მართალია, ამ დროს კაზმი ღუმელში იდეალურად შეიძლება განაწილდეს, მაგრამ არის ბევრი და გადამწყვეტი უარყოფითი მხარე, პირველ რიგში ჩატვირთვის ხანგრძლივობა. 10 ტ ტევადობის ღუმელის ჩატვირთვას უნდებოდნენ 1-2 საათს, რაც კაზმის გადნობის დროზე უფრო მეტი იყო და კიდევ ის, რომ მთლიანად არ შეიძლებოდა ღუმელის არის გამოყენება: კაზმით მთელ ღუმელს ვერ ავსებდნენ. ამიტომ აღნიშნული ხერხით კაზმის ჩატვირთვა ამჟამად აღარ ხდება. კალათებით კაზმის ჩატვირთვისას ხანგრძლივობა შეუდარებლად მცირდება. ღუმელის ტევადობის მიუხედავად, ამ ოპერაციას სჭირდება 3-7 წუთი და დამოკიდებულია მხოლოდ ამწეების გადაადგილების სისწრაფეზე. კაზმი ღუმელში რომ ჩაიტვირთოს საჭიროა კამარა აიხადოს და მოშორდეს ღუმელს. სწორედ კამარის მოხდის ხერხების მიხედვით ღუმელები იყოფა სამ ძირითად ჯგუფად: 1. კამარა ჩამოკიდებულია ჯაჭვებით კამარის ზემოთ მოთავსებულ ხიდზე. ჩატვირთვისას კამარა აიწევა და გადაადგილდება უმთავრესად საჩამოსხმო მალისაკენ. კამარაახდელ ღუმელში კაზმი კალათით ჩაიტვირთება (სურ. 5.24); 2. ხიდი, რომელზეც ჩამოკიდებულია კამარა, ჩამაგრებულია უძრავად. კამარა აეხდება ღუმელს და ღუმელი გამოგორდება სამუშაო ბაქნისაკენ, 3. ელექტროდების დამტკრები და კამარა დამაგრებულია ერთად მბრუნავ ბრჯენზე (კრონშტეინზე). კაზმის ჩატვირთვის წინ აიხდება კამარა და ბრჯენი შემოტრიალდება 70-100°-ით საჩამოსხმო მალისაკენ.



სურ. 5.24. ჩასატვირთი კალათა.

ბოლო ხერხი ყველაზე უკეთესად ითვლება და თანამედროვე ღუმელების უმეტესი ნაწილი მზადდება ასეთი მექანიზმით.

5.3.9. აირებისა და მტვრის გამწოვი მექანიზმები

დიდი ტევადობის თანამედროვე ღუმელები მუშაობისას გამოყოფენ დიდი რაოდენობის აირებს, უმთავრესად CO-ს. აირების დიდი რაოდენობით გამოყოფას ხელს უწყობს აიროვანი ჟანგბადის და კაზმის გასახურებლად გამოყენებული აირების შებერვა. 100 ტ ტევადობის ღუმელიდან გამოყოფილი აირების რაოდენობა დაჟანგვით პერიოდში (იმ პერიოდში ჩათვლით, რომელიც გამოიყენება CO-ს ბოლომდე დაჟანგვისათვის) აღემატება 20000 მ³/საათში, ადღგენით პერიოდში – 2–3 ათას მ³/საათში. აირებს თან სდევს მტვერი, რომელიც დასაშვებზე გაცილებით მეტია (დასაშვებია 150 მგ/მ³). ამიტომ აირების გამოწოვას ღუმელებიდან და მის გასუფთავებას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება. უნდა აღინიშნოს, რომ აკრძალულია ქარხნის მშენებლობა, რომელიც გააჭუჭყიანებს ატმოსფეროს ე.ი. იმ მოწყობილობების გარეშე, რომელიც უზრუნველყოფს ღუმელებიდან გაწოვილი აირების გაწმენდას. ამჟამად გამოიყენება ნაქსოვი ფილტრები, დეზინტეგრატორები და ელექტროფილტრები. მათ კარგი წარმადობა გააჩნიათ და გამოყოფილ აირებსაც კარგად ასუფთავებენ (მაგ. ელექტროფილტრებში გატარების შემდეგ ღუმელიდან გამოყოფილ აირებში მტვერი 50 მგ/მ³-მდე იწმინდება). გამწმენდი საშუალებები იდგმება სადნობი საამქროს გარეთ, რომელიც ღუმელს უკაფშირდება მიღებით.

თ ა ვ ი IV

ელექტრული მოწყობილობა

ელექტრორკალური სადნობი ღუმელების ელექტრომოწყობილობის მუშაობის პრინციპები დამოკიდებულია თვით ღუმელის თავისებურებებზე. დიდი ტევადობის ღუმელი წარმოადგენს დიდი რაოდენობის ელექტროენერჯის მომხმარებელ აგრეგატს. თითოეული ღუმელი უზრუნველყოფილია საკუთარი ტრანსფორმატორით, რომლებიც მიერთებულია მაღალი ძაბვის (35–110კვ) ქსელთან. ღუმელის ტრანსფორმატორი წარმოადგენს ძაბვის

დამადაბლებელ ტრანსფორმატორს. ის ძაბვას 110-600 ვ-მდე ამცირებს. ამიტომ დენის ძალა ამ უბანზე აღწევს რამდენიმე ათას ამპერს. ამ უბანზე სიმძლავრის დიდი დანაკარგების თავიდან აცილებისათვის ღუმელის ტრანსფორმატორს უშუალოდ ღუმელთან აყენებენ. ღუმელის მუშაობისას, დნობის ტექნოლოგიური პროცესების მიხედვით, საჭიროა ძაბვის (კვლა ფართო ზღვრებში. გადნობის პერიოდში, როცა კაზმი ჯერ კიდევ ცივია, რკალი არამდგრადია, მოკლეა და მისი სიმძლავრის გასაზრდელად მუშაობენ მაღალ ძაბვებზე. აღდგენით პერიოდში რკალის სიგრძე იზრდება ღუმელის თბური პირობების გამო და ღუმელის ამონაგი რომ არ დაიწვას რკალს ამოკლებენ ძაბვის შემცირებით. ძაბვის ასეთი რეგულირებისათვის ღუმელის ტრანსფორმატორს გააჩნია ძაბვის რამდენიმე საფეხური (მცირე ტევადობის ღუმელების ტრანსფორმატორს - 10-15, დიდი ტევადობის ღუმელებისას - 25-30).

ამრიგად, ელექტრული ღუმელის სქემაში უნდა შედიოდეს: ძაბვის დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი დროსელებთან ერთად (მძლავრ ტრანსფორმატორებს დროსელები შიგვე აქვთ ჩადგმული და ისინი საჭიროა ინდუქციური წინაღობის გასაზრდელად, რკალი მყარად რომ ენთოს); ღუმელი ელექტროდებით და ღუმელის სიმძლავრის მარეგულირებელი მოწყობილობები; ელექტრული ქსელი მაღალი ძაბვის დამადაბლებელ ტრანსფორმატორსა და ელექტროდებს შორის ანუ, როგორც მას უწოდებენ. მოკლე ქსელი (ამ უბანზე, როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, ხდება სიმძლავრის კარგვა და ამიტომ ეს უბანი რაც შეიძლება მოკლე უნდა იყოს); საზომი, დამცველი და სხვა მოწყობილობები.

ღუმელში ელექტროდების მოკლე ჩართვა კაზმზე ჩვეულებრივი ტექნოლოგიური მოვლენაა. ამიტომ დანადგარი უსაფრთხო უნდა იყოს მისგან. ამისათვის ცდილობენ შეზღუდონ დენის ბიძგების სიდიდე სიმძლავრის სწრაფად მოქმედი ავტომატური მარეგულირებლებით.

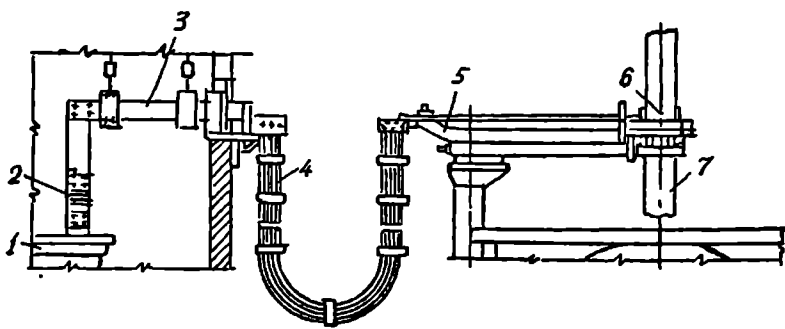
ღუმელის ტრანსფორმატორს მუშაობა უხდება მისთვის დამახასიათებელ განსაკუთრებულ პირობებში. ამიტომ მაღალი ძაბვის დადაბლების გარდა, მან უნდა გაუძლოს დენის დიდ ძალას დაბალი ძაბვის მხრიდან; უნდა გააჩნდეს გრაგნილის მომატებული ინდუქციური წინაღობა, რათა შეამციროს მოკლე ჩართვის დენის ძალა ნომინალურ მნიშვნელობამდე (2.5-3.5 კა), რადგან ღუმელების ელექტროდები მოკლედ ირთება ლითონურ ჯართთან რკალის ანთების წინ ან კაზმის ჩამოშლის შემთხვევაში (მოკლე ჩართვის შემთხვევაში წარმოიშობა დენის

ძალის ძლიერი დარტყმები, რისთვისაც გრაგნილები და დენის გამოძევანები კარგად უნდა დამაგრდეს); უნდა გააჩნდეს ძაბვის რეგულირების უწყვეტი უნარი დატვირთვის ქვეშ.

ტრანსფორმატორის რეაქტიული წინაღობა შეადგენს მთლიანი წინაღობის 7-8 %-ს. მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის - 5-10 %-ს, ხოლო რკალის მყარი მუშაობისათვის და მოკლე ჩართვების დენის ძალების შემცირებისათვის საჭიროა რეაქტიული წინაღობა იყოს 30-40 %. ამისათვის ღუმელის ქსელში, მაღალი ძაბვის მხრიდან, ჩართული უნდა იყოს დამატებითი რეაქტიული წინაღობა - დროსელი. რადგან დროსელის ინდუქციურობა არ უნდა იყოს დამოკიდებული დენზე, მისი გულარი უნდა მუშაობდეს ისეთ რეჟიმში, რომ შორს იყოს გადაჯერებისაგან. დიდი ტევადობის ღუმელების შემთხვევაში, მოკლე ქსელის რეაქტიული წინაღობა აღწევს 20 %-ს. ამ შემთხვევაში აღარ არის საჭირო დამატებითი წინაღობის ჩართვა. ხოლო ზემოქაღვარი ღუმელების შემთხვევაში ისიც შეიძლება მოხდეს, რომ საჭირო იყოს მისი შემცირება.

ტრანსფორმატორები იმგვარადაა გათვლილი, რომ მუშაობისას ~2 საათის განმავლობაში იყოს შესაძლებელი მათი გადატვირთვა 20 %-ით და შემდგომში - ნომინალური დენის ძალით მუშაობა.

რკალური ღუმელის მოკლე ქსელი წარმოადგენს დენგამტარს, რომელიც ტრანსფორმატორს აერთებს ელექტროდებთან (სურ. 525). ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხრიდან გამოდის სალტები. სალტე მზადდება სპილენძის სწორკუთხა ზოლისაგან.



სურ. 525. მოკლე ქსელის სქემა: 1-ტრანსფორმატორი; 2-3-ბრტყელი სპილენძის სალტეების შეკერა; 4-მოქნილი დენგამტარი; 5-სპილენძის სალტეების ან წყლის საცივებელი მილების შეკერა; 6-ელექტროდსაჭერი; 7-ელექტროდი.

იგი უერთდება მოქნილ კაბელს, რომელიც ნახევარწრის სახით (ნახევარწრით მოქნილი კაბელის დაგრძელება, რაც მოკლე ქსელისათვის არასასურველია, იმიტომ ხდება, რომ შესაძლებელი იყოს ელექტროდების აწვეა და ღუმელის გადაყირავება) უერთდება წყლით საცივებელ დენგამტარ მილებს. მილები კი უერთდება ელექტროდის დამტკერებს და დენი მათი საშუალებით გადადის ელექტროდებზე.

რადგან ღუმელზე მიდის დიდი სიმძლავრე, ხოლო რკალზე ძაბვა დაბალია, მოკლე ქსელში დიდი დენი გაივლის. ამ მოვლენამ გამტარების გადასურება რომ არ გამოიწვიოს, მოკლე ქსელის განიკეთი ფართო უნდა იყოს, ხოლო გამტარების მასალა — დენის მაღალი კუთრი სიმკვრივის მქონე. უმთავრესად იყენებენ სპილენძს. დენის სიმკვრივეს მოკლე ქსელის იმ უბანზე, რომელიც წყლით არ ცივდება, იღებენ $\sim 1,5$ ა/მმ². წყლით საცივებელი კაბელებისათვის დასაშვებია 2–3 ა/მმ², ხოლო წყლით საცივებელი მილებისათვის — 6–8 ა/მმ² (სინამდვილეში მას იღებენ 3–4 ა/მმ²). ამრიგად, მოკლე ქსელში რაც შეიძლება დაბალი ელექტრული დანაკარგები უნდა გექონდეს. გარდა ამისა, სასურველია, რომ სიმძლავრე თანაბრად განაწილდეს ფაზების მიხედვით და კქონდეს რაც შეიძლება დაბალი ინდუქციურობა, რათა ღუმელის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი იყოს მაღალი. ღუმელის მუშაობისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ფაზების ერთნაირ დატვირთვას. ამის მოგვარება საკმაოდ რთული საქმეა. როდესაც საქმე ეხება ფაზებზე სხვადასხვა დატვირთვის მოსვლას, კაზმის არათანაბარი განაწილებისას ღუმელში (იმ ფაზის რკალი, რომელიც კაზმის დიდ ნატყერთან მოხედება გარკვეული დროის განმავლობაში ანთია თანაბრად. დანარჩენ ორ ფაზას რკალის ქვეშ კი შეიძლება შეხედეს სხვა ზომის კაზმი და რკალი იცვლებოდეს კაზმის წინალობის ცვლილებასთან ერთად). ასეთ შემთხვევებში დატვირთვების გათანაბრება ადვილია ღუმელის ავტომატური რეგულირების კარგი მუშაობით, მაგრამ არსებობს ფაზების არათანაბარი დატვირთვის სხვა მიზეზები. ფაზებზე დენმიმყვანები სწორხაზოვნად ერთ სიბრტყეშია განლაგებული, ამიტომ მათი ურთიერთინდუქციურობა არათანაბარია. ამის გამო, ფაზებში ერთიდაიგივე სიდიდის დენის გავლისას აინთება სხვადასხვა სიმძლავრის რკალი, რაც გამოიწვევს ღუმელის ამონაგის არათანაბარ ცვეთას. ღუმელის კედლის ის ადგილი, რომელიც მძლავრი რკალის ახლოს მოხედება—დაიწვება.

ელექტროდები

ელექტროდების დანიშნულებაა ელექტრული ენერგია უშუალოდ ღუმელში მიაწოდოს რკალის ასანთებად. თავდაპირველად გამოიყენებოდა ნახშირის ელექტროდები. მაგრამ შემდგომში, ღუმელის ტევადობის და სიმძლავრის გაზრდასთან დაკავშირებით, ასეთი ელექტროდების გამოყენება ფოლადის გამოსადნობად უვარგისი გამოდგა. ელექტროდებს წაყენება შემდეგი მოთხოვნები არა მარტო ელექტრულ, არამედ მექანიკურ თვისებებზეც: 1. უნდა გააჩნდეთ რაც შეიძლება დაბალი კუთრი ელექტროწინაღობა, რათა მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი ელექტროენერგიის დანაკარგები; 2. იმისათვის რომ არ გატყდეს მოქმედი გამჭიმავი, მღუნავი ან მკუმში დატვირთვებისაგან და არ გამოიწვიოს ღუმელის გაჩერება, ელექტროდებს უნდა გააჩნდეს კარგი მექანიკური თვისებები; 3. რადგან მათ უხდებათ მუშაობა მაღალ ტემპერატურზე, უნდა ჰქონდეს მაღალი თბომედეგობა, ტემპერატურის მკვეთრი შეცვლისას არ უნდა სკდებოდეს და არ ეფშენებოდეს ზედაპირი. ელექტროდებს უნდა გააჩნდეს მკაცრი გეომეტრიული ფორმა, — ცილინდრი, ამიტომ კარგად უნდა მოხდეს მათი დამუშავება; 5. რადგან ელექტროდები მუშაობს მაღალტემპერატურულ პირობებში (როგორც ღუმელის მუშა ნაწილში, ისე მის გარეც, კამარის ზემოთ), უნდა იქანგებოდეს პაერზე, რაც შეიძლება მაღალ ტემპერატურაზე; 6. მათი მიღება ძვირი არ უნდა იყოს (ფოლადის თვითღირებულებაში დახარჯული ელექტროენერგიის ღირებულება უფრო მცირეა, ვიდრე დახარჯული ელექტროდებისა); 7. მცირე რაოდენობით უნდა შეიცავდეს მავნე მინარეგებს (გოგირდი, აირები, ნაცარი).

როგორც წესი, ელექტროდები მზადდება ცალკე ქარხნებში. ამიტომ ელექტროდების ტრანსპორტირების გაადვილების მიზნით, ისინი ძალიან გრძელი არ უნდა იყოს. მათი სიგრძე დამოკიდებულია დიამეტრზე და იცვლება 1000-დან 2400 მმ-მდე. რასაკვირველია, ამ სიგრძის მოკლე ელექტროდებით ღუმელები ვერ იმუშავებს, რადგან ღუმელის სამუშაო სივრცე გაცილებით მაღალია მცირე ტევადობის ღუმელებისათვისაც კი, რომ აღარაფერი ვთქვათ დიდი ტევადობის ღუმელებზე. ელექტროდების

სიგრძეს ირჩევენ ღუმელის სამუშაო სივრცის ზომების მიხედვით. მისი ანგარიში შეიძლება ტოლობით:

$$l_{\Sigma} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + (100-150 \text{ მმ}),$$

სადაც l_{Σ} — ელექტროდის მთლიანი სიგრძე, მმ;

h_1 — ღუმელის სამუშაო სივრცის სიმაღლე ქვედის ყველაზე დაბალი წერტილიდან კამარის ყველაზე მაღალ წერტილამდე, მმ;

h_2 — კამარის სისქე, მმ;

h_3 — კამარის ზემოთ ამოყოფილი შემამჭიდროებელი რგოლის (ეკონომიზირი) სიმაღლე, მმ;

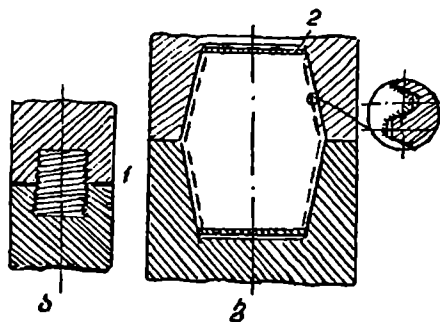
h_4 — მანძილი შემამჭიდროებელ რგოლიდან ელექტროდამტერის კორპუსის ქვედა წელამდე, მმ;

h_5 — ელექტროდამტერის კორპუსის სიმაღლე, მმ;

h_6 — ერთ-ორ დნობაზე საჭირო რაოდენობის ელექტროდის სიგრძის მარაგი, მმ;

100–150 მმ ელექტროდის სიგრძის მარაგი კამარის სისქის გაზრდის შემთხვევაში.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ელექტროდის საერთო სიგრძე გამოდის 5–9 მ-მდე და დამოკიდებულია ღუმელის ტედალობაზე. როგორ იქცევიან იმისათვის, რომ ასეთი სიგრძის ელექტროდი მიიღონ თუ თითოეული მათგანის სიგრძე დაახლოებით 2,5 მ-ია? ამისათვის, ელექტროდებს ორივე მხრიდან უკეთდება ხრახნიანი ხერვლები. ამ ხერვლებში ჩაიხრახნება სუსტად იმავე დიამეტრის ნიპელი (სურ 5.26). დამზადებული იმავე მასალისაგან, რაც ელექტროდია. ნიპელის სიგრძე ორჯერ უფრო მეტია, ვიდრე ხრახნიანი ხერვლის სიგრძე. ეს იმიტომ, რომ მასზე



სურ. 5.26. ელექტროდების შეერთება ცილინდრული (ა) და კონუსური (ბ) ნიპელებით: 1—გრაფიტის წკირი (შტიფტი); 2—ელექტროდების ამოხრახნის საწინააღმდეგო სქელფისის სადები.

დაიხრახინოს მეორე ელექტროდი და ა.შ. ღუმელის მუშაობისათვის საჭიროა ამგვარად „ასხმული“ 2-3 ელექტროდისაგან შემდგარი „ღერო“. ნიკელი ელექტროდში უნდა ჩაიხრახინოს მაგრად, რომ ელექტროდთან მოვიდეს კარგ შეხებაში და შემკირდეს დენის დანაკარგები საკონტაქტო ზედაპირზე. გამზადებულ ღეროს ზემოდან ეხრახნება ლითონის (უფრო ხშირად ფოლადის) ნიკელი, რომელსაც ზემოდან „ყური“ აქვს მიდუღებული. ასეთი ნიკელი გარდა იმისა, რომ მისი საშუალებით ხდება ელექტროდის აწვევა ამწით, იკავს ელექტროდში ამოჭრილ ხრახინიანი ხერეულს დაზიანებისა და ჭუჭყისაგან. ღუმელის მუშაობისას ელექტროდი იწვის, ხანდახან ჩამოტყდება (განსაკუთრებით გადნობის პერიოდში) და ამიტომ მოკლდება. დადგება ისეთი მომენტი, როცა ელექტროდის „ღეროს“ სიგრძე გაუტოლდება ელექტროდის დამჭერიდან ქვედის ყველაზე დაბალ ან გამდნარი ლითონის ზედაპირამდე მანძილს. მაშინ, მათ ქვევით დაშვებას და რკალის ანთებას ხელს შეუშლის კამარა. ამიტომ ელექტროდების ღეროების დაგრძელება თავის დროზე უნდა მოხდეს, უმთავრესად (რაიმე ავარიული შემთხვევის გარდა, მაგალითად ელექტროდის ღეროს გადატეხა გადნობის პერიოდში ჩამოწოლილი კაზმით დნობებს შუა დროის მონაკვეთში. ამისათვის, ახალ ელექტროდს ლითონის ნიკელის საშუალებით ასწვევენ და მიიტანენ იმ ელექტროდის ღეროს თავზე, რომლის დაგრძელებაც არის საჭირო. მოხსნიან ლითონის ნიკელს, ჩახრახინიან გრაფიტისას და მასზე დაახრახინიან მიტანილ ელექტროდს. შემდეგ ელექტროდის დამჭერებს დაუშვებენ იქამდე, რომ ელექტროდის წვერი რაიმეს (მაგალითად, ქვედს ან კაზმს) დაეყრდნოს. მოუშვებენ ელექტროდის დამჭერის მომჭერებს, ასწვევენ ელექტროდის დამჭერებს და ისევ დაუჭერენ მომჭერებს. შემდეგ ელექტროდის ღეროს ასწვევენ და ჩართავენ ღუმელს. ხშირად ისეთი შემთხვევაცაა, რომ ელექტროდის ღეროს დასაგრძელებლად ასეთი ხერხი არ გამოდგება (ელექტროდის ღერო თუ შუაში გადატყდა, მაშინ მას ვერაფერს ვერ დავაყრდნობთ, რათა ზევიდან ახალი ელექტროდი დავახრახინოთ). ამისათვის, ყოველი ღუმელის მახლობლად საშუალო ბაქანზე ამოჭრილია რამდენიმე ხერელი, რომლებშიც წინასწარ ამზადებენ ელექტროდების ღეროებს. თუ მცირე დიამეტრების ელექტროდების დაგრძელება ზედ ღუმელზე ადვილად განსახორციელებელია, დიდი დიამეტრის ელექტროდებისათვის – საკმაოდ ძნელია. ამიტომ ისეთ ღუმელებზე, რომლებზეც დიდი დიამეტრის

ელექტროდებია გამოყენებული. ელექტროდების ღეროებს ამზადებენ ცალკე. ელექტროდების დახრახენა მექანიკურად ხდება.

ელექტროდების თვისებები დამოკიდებულია მასალების ხარისხსა და დამზადების ტექნოლოგიაზე. ნახშირის ელექტროდები მცირე (100–120 მმ) დიამეტრების მზადდება. მასალად გამოიყენება ანთრაციტი ან გამომწვარი ანთრაციტი, კოქსი, ნაეთობის კოქსი, ქვანახშირის სქელფისი და ფისი. ეს მასალები გამოიწვება ტენის და აქროლადების მოხაშორებლად. იწყება და გახურებულ მდგომარეობაში აირევა ერთმანეთში. ამასთან, ზუსტად უნდა იყოს დაცული როგორც მათი რაოდენობა, ასევე მარცვლის ზომები. ნარევეს წნეხენ 25–40 მგპა წნევით. მიღებულ ელექტროდებს ათავსებენ ღუმელში, აყრიან ანთრაციტის ან კოქსის ნამჭერევებს (რომ არ დაიუნჯოს) და გამოწვავენ 1300 °C-ზე 150 საათის განმავლობაში. შემდეგ აცივებენ, ამოჭრიან ნიჟელების ხერელებს და ელექტროდები მზადაა.

გრაფიტირებული ელექტროდების დამზადება უფრო რთულია. ის არ მზადდება ბუნებრივი გრაფიტისაგან, რადგან მას დაბალი მექანიკური და ელექტრული თვისებები აქვს. ელექტროდებს ამზადებენ ხელოვნური გრაფიტისაგან, რომელიც მიიღება ნახშირის ელექტროდების გამოწვით სპეციალურ ღუმელებში. ნახშირის ელექტროდებს ათავსებენ წინაღობის ელექტროღუმელებში, სადაც წინაღობებად თვით ნახშირის ელექტროდებია. ახურებენ 2000–2400 °C-მდე დიდი ხნის განმავლობაში. ამ დროს იცვლება ელექტროდის მასალის კრისტალური აღნაგობა, რის შედეგადაც ძალიან მცირდება ელექტროწინაობა და იზრდება მექანიკური თვისებები.

ცხრილი 5.1

გრაფიტისა და ნახშირის ელექტროდების ძირითადი თვისებები

თვისებები	გრაფიტის ელექტროდები	ნახშირის ელექტროდები
მოცულობითი მასა, კგ/ღმ ³	1.55–1.6	1.55–1.6
სიმკვრივე, გ/სმ ³	2.2	1.9–2.0
სიმტკიცის ზღვარი გაქიმვაზე, ნ/სმ ²	500–850	300–760
სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, ნ/სმ ²	2100–2800	1500–3000
თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/(მ·°C)		
20 °C–სას	~ 150	~ 35
1000 °C–სას	~ 115	~ 58
ქაერზე დაჟანგვის დასაწყისი, °C	600	430
ელექტრული ხეიდრითი წინაღობა, 10 ⁻⁶ ომ.მ	8–13	40–70
საშუალო ხარჯი 1000 კვტ.სთ ღუმელებში, კგ	7–10	16–20

როგორც 5.1 ცხილიდან ჩანს, გრაფიტირებული ელექტროდების ხარჯი 2.5-ჯერ მცირეა ნახშირბადის ელექტროდებთან შედარებით.

ამით საგრძნობლად მცირდება მათი სიძვირით გამოწვეული ხარჯები. გრაფიტის ელექტროდების ყველაზე დიდ ღირსებად, ნახშირის ელექტროდებთან შედარებით, ითვლება მისი დაბალი ხვედრითი ელექტრული წინააღობა. ამის გამო, შეიძლება ვისმართო უფრო მცირე დიამეტრის ელექტროდი, რაც იწვევს ელექტროდების „ღეროს“ საგრძნობ შემსუბუქებას. ეს კი, თავის მხრივ, აადვილებს მათი დამჭერების, გადამაადგილებელი მექანიზმების მუშაობას. გარდა ამისა, გრაფიტის ელექტროდებით მუშაობისას უფრო ნაკლები შესაძლებლობაა ლითონის დანახშირბადიანებისა. ამჟამად, გრაფიტის ელექტროდები მზადდება 75–დან 610 მმ-მდე, ცნობილია, რომ შექმნილია კიდევ უფრო დიდი დიამეტრის სპეციალური ელექტროდები. ზემოქავერი ღუმელების შექმნამ გამოიწვია ელექტროდების ხარისხის გაუმჯობესების აუცილებლობა. მაგალითად, 610 მმ-იან ელექტროდებს შეუძლია გაატაროს 42000 ა დენი. მაგრამ თუ შევამცირებთ გადნობის პერიოდს, მაშინ – 50000 ა. მაგრამ ესეც აღარ არის საკმარისი. რადგან 100 ტ ტევადობის თანამედროვე ღუმელებზე დადგმულია ტრანსფორმატორები, რომელთაც შეუძლიათ 90000 ა-მდე დენის გატარება. მეტი სიმძლავრის ათვისებას ხელს უშლის ელექტროდის ხარისხი. ამჟამად უკვე არსებობს 600 მმ-იანი ელექტროდები, რომლებიც 90000 ა დენს ატარებენ.

რადგან ელექტროდები ძნელი მისაღები და ძვირია, ამიტომ ყოველნაირად ცდილობენ მათი ხარჯის შემცირებას. ამჟამად იქმნება მუდმივ დენზე მომუშავე ღუმელები, რომლებსაც ელექტროდების ხარჯი 1 ტ ლითონზე 2,5 კგ-მდე შემცირდა. საერთოდ კი ზემოქავერ ღუმელებზე ელექტროდის ხარჯია 4–6 კგ/ტ-ზე. სოკიერთ ქვეყანაში იყენებენ საღებავებს, რომლებიც ელექტროდებს მუშაობის პროცესში დაჟანგვისაგან იცავენ. მათ შეუძლიათ 20 %-მდე შეამცირონ ელექტროდების ხარჯი.

თ ა ვ ი VI

ღუმელის მუშაობის ოპტიმალური რეჟიმის შერჩევა

თანამედროვე ელექტრორკალური ღუმელი მუშაობისას ხარჯავს დიდი რაოდენობის ელექტრულ ენერგიას. გარდა ამისა,

ფოლადის დნობა შედგება რამდენიმე პერიოდისაგან. რომლებსაც ესაჭიროებათ სხვადასხვა სიმძლავრე.

რადგან ელექტროენერჯის ხარჯის ფოლადის გამოდნობაზე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება, ამიტომ საჭიროა ღუმელის ელექტრონული მახასიათებლების შერჩევა. ელექტრონული მახასიათებლებს ცდებით ადგენენ მომუშავე ღუმელებზე, სხვადასხვა დენის ძალისა და ძაბვის საფეხურებისათვის. მათი საშუალებით ვლებულობით დამოკიდებულებას აქტიურსა და მოჩვენებით სიმძლავრეებს შორის და, მაშასადამე, სიმძლავრის კოეფიციენტსა და დენის ძალას შორის. ამ შემთხვევაში, რკალების სიმძლავრის დასადგენად საჭიროა დამატებითი ვატმეტრების დაყენება უშუალოდ ელექტროდებზე კამარაში ჩაშვების ადგილის მახლობლად. ასეთი ხერხით იკვლევენ საინტერესო დენის ძალების მნიშვნელობებს, რომლებიც უმაღლეს სიმძლავრეებს შეესაბამება. საერთოდ, მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები და მახასიათებლებს შორის კავშირი: $P_{\Sigma} -$ ქსელიდან მიღებული აქტიური სიმძლავრე, $P_{\Sigma} = 1.73UI \cos \varphi 10^{-3}$ კვტ; $P_{\Sigma} -$ ელექტრონული დანაკარგების სიმძლავრე, $P_{\Sigma} = 3I^2 R 10^{-3}$ კვტ, სადაც $R -$ მოკლე ქსელის აქტიური წინაღობაა; $P_{\Sigma} -$ სასარგებლო სიმძლავრე (სიმძლავრე რკალებზე), $P_{\Sigma} = P_{\Sigma} - P_{\Sigma} = (1.73UI \cos \varphi - 3I^2 R) \times 10^{-3}$ კვტ; $\eta_{\Sigma} -$

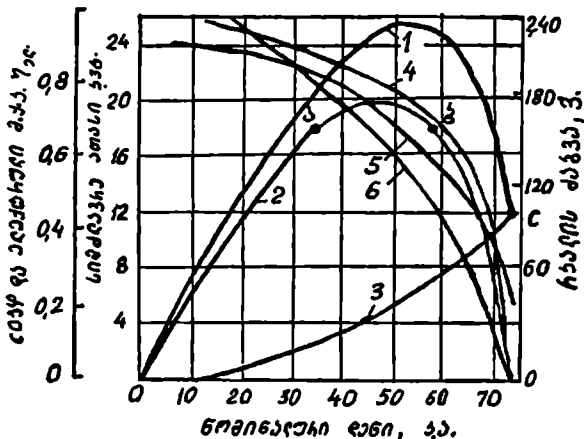
ელექტრონული მ.კ.კ. $\eta_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma}}$. ქსელიდან აქტიური სიმძლავრის

გარდა, P_{Σ} მიიღება აგრეთვე რეაქტიული სიმძლავრე P_{Σ} . თუ გეომეტრიულად შევკრიბავთ აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეებს,

მივიღებთ მოჩვენებით სიმძლავრეს $P_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + P_{\Sigma}^2}$,

$\cos \varphi$ -დანადგარის სიმძლავრის კოეფიციენტი. $\cos \varphi = P_{\Sigma} / P_{\Sigma}$. ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ რაც მეტია რეაქტიული სიმძლავრე, მით ნაკლებია სიმძლავრის კოეფიციენტი და, მაშასადამე, უარესია ელექტრონული ენერჯის გამოყენება.

განვიხილოთ 100 ტ ტევადობის ღუმელის ელექტრონული მახასიათებლები (სურ 5. 27). ამ სურათიდან ჩანს, რომ სასარგებლო სიმძლავრე მაშინ არის უმაღლესი (2000 კვტ), როცა დენის ძალაა 47000 ა. ელექტრონული დანაკარგების სიმძლავრე 4500 კვტ, ხოლო ქსელიდან მიღებული სიმძლავრე - 24500 კვტ. ამ სურათიდანვე ჩანს, რომ სასარგებლო სიმძლავრის მრუდს გააჩნია მაქსიმუმი. მაშასადამე, ერთი და იგივე სიმძლავრის სიდიდე შეიძლება მივიღოთ დენის ძალის სხვადასხვა მნიშვნელობისას. მაგალითად, 35 კა, რაც შეესაბამება ა წერტილს, გვაძლევს



სურ. 5.27. 100 ტ ტვეადობის რკალური ღუმელის ელექტრული რეჟიმის მანევრებლები (417 ე ძაბვის საფეხურზე): 1-გამოყენებული აქტიური სიმძლავრე; 2-რკალების სასარგებლო სიმძლავრე $P_{\text{სარ}}$; 3-ელექტრული დანაკარგების სიმძლავრე $P_{\text{დ}}$; 4-ელექტრული მ.კ. $\eta_{\text{ელ}}$; 5-სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos\varphi$; 6-რკალის ძაბვა $U_{\text{ა}}$.

უფრო უკეთეს მანევრებლებს ($\cos\varphi=0,84$; $\eta_{\text{ელ}}=0,86$; დანაკარგები 2800 კვტ). ბ წერტილის შეესაბამება 57 კა დენის ძალა და უარესი მანევრებლები ($\cos\varphi=0,60$; $\eta_{\text{ელ}}=0,75$; დანაკარგები 7000 კვტ) ე.ი. უნდა ვიმუშაოთ ა წერტილის შესაბამისი მონაცემებით. მაგრამ, თუ გავითვალისწინებთ ზემოთაღნიშნულ დამატებით მუშაობისას ამონაგის მედეგობის პირობებს, მაშინ უკეთესია ბ წერტილის მონაცემებით მუშაობა.

5.6.1. თხევადი ლითონის ელექტრომაგნიტური ამრევის მოწყობილობა

დიდი ტვეადობის ღუმელებში, რომელთა აბაზანის სიღრმე აჭარბებს 0,8 მ-ს, სასურველია ლითონის არევა, განსაკუთრებით, ალდგენით პერიოდში. თხევად ლითონის განუანგვის და განგოგირდების სინქარე დამოკიდებულია რეაქციის პროდუქტების დიფუზიის სისწრაფესე ლითონიდან წიდაში და წიდიდან ლითონში. დიფუზიის სისწრაფის (სინქარის) გასაზრდელად საჭიროა თხევადი ლითონის არევა. ლითონის არევა ხელით ძალიან მიძიმე და რთული სამუშაოა. განსაკუთრებით მაშინ, როცა ღუმელ-

ში ლეგირებისათვის დიდი რაოდენობით შეჰყავთ ძნელდნობადი მალეგირებლები (FeW, FeMo, FeCr და სხვა). მართალია, ელექტროლი რკალი ლითონს ამოძრავებს, მაგრამ ეს არ არის საკმარისი. (0.5 ტ ტევადობის ღუმელებში აირევა ლითონის საერთო მოცულობის 30 %, ხოლო 30 ტ ტევადობის ღუმელებში – მხოლოდ 3 %). ეს მონაცემები ცხადყოფს თუ რაოდენ საჭიროა დიდი ტევადობის თანამედროვე ღუმელებისათვის ლითონის ასარევი მოწყობილობა. გარდა ამისა, თხევადი ლითონი სითბოს იღებს რკალისგან და შემდგომ თბოგადაცემით ხურდება ლითონის ქვედა ფენები. ტემპერატურულმა სხვაობამ თხევადი ლითონის ზედა და ქვედა ფენებს შორის შეიძლება მიაღწიოს 100 °C-ს. ხოლო წიდის მოხდის გაადვილებისათვის, თხევადი ლითონის წინასწარ გამისნული მიმართულებით მოძრაობა ხელს უწყობს წიდის მოხდას. ამრიგად, თხევადი ლითონის ამრევა მოწყობილობამ უნდა შეძლოს: ლითონის ინტენსიური არევა მალეგირებელი ელემენტების გახსნისა და მათი თანაბარი განაწილებისათვის; ტემპერატურის გაერთვარონება აბაზანაში; განუანგვისა და განგოვირდების პროცესების დაჩქარება; წიდის მოხდის გაადვილება.

არსებობს ლითონის ელექტრომაგნიტური არევის ორი ხერხი: მბრუნავი ელექტრომაგნიტის (როტორი) მიერ შექმნილი ველით და უძრავი (სტატორი) მაგნიტის მიერ შექმნილი „მოძრავი“ ველით.

იმისათვის, რომ როტორით ან სტატორით შექმნილმა ველმა დაუკარგავად შეაღწიოს თხევად აბაზანაში, ღუმელის ქვედის გარსაცმს ამზადებენ არამაგნიტური ფოლადისაგან (ელექტრო-მაგნიტური ამრევის მოწყობილობა თავსდება ღუმელის ქვედთან).

VI ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

ფოლადის ღწობის ტექნოლოგია ღია ელექტრორკალურ ღუმელებში

თ ა ე ი I

ფუჰე და მჰავე ელექტრორკალურ ღუმელებში ფოლადის ღწობის ტექნოლოგიის საფუძველები

ფოლადი წარმოადგენს ისეთ მტკიცე საკონსტრუქციო მასალას ურომლისოდაც წარმოუდგენელია წარმოების ნებისმიერი დარგის განვითარება. ამიტომ ქვეყნის განვითარების დონის ერთ-ერთ ძირითად მაჩვენებლად გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა ითვლება.

მყარი ფოლადი წარმოადგენს ნახშირბადის, მანგანუმის, კაუბადის (ანუ სილიციუმის), ქრომის, ნიკელისა და სხვა ელემენტების შენადნობს რკინასთან. ეს და სხვა მრავალი ელემენტი ფოლადში სპეციალურად შეჰყავთ, რომ გაუმჯობესდეს მისი ხარისხი, სხვადასხვა თვისება და მისგან დამზადებული კონსტრუქციებისა თუ დეტალების მდგრადობა. წინასწარი გამოკვლევებით ძირითადად ცნობილია თუ რა გავლენას ახდენს ამა თუ იმ ელემენტის გარკვეული რაოდენობა ფოლადის თვისებებზე. ის ქიმიური ელემენტები, რომელთა შემცველობაც აუმჯობესებს ფოლადის თვისებებს, სასურველია შედიოდეს მის შედგენილებაში.

ფოლადი, გარდა სასურველი ელემენტებისა, სამწუხაროდ, ყოველთვის შეიცავს მავნე მინარევების – ფოსფორის, გოგირდის, წყალბადის, ჟანგბადის აზოტის და სხვ. გარკვეულ რაოდენობას. ეს ელემენტები ფოლადში დნობის პროცესში ხვდება კაზმიდან და, ნაწილობრივ, ღუმელის სამუშაო სივრციდან, ხოლო დასაშვები ზღვრული ოდენობის ზემოთ საგრძნობლად აუარესებს მის ხარისხსა და მექანიკურ თვისებებს. ამიტომ ფოლადის მდნობელის ერთ-ერთი უმთავრესი ამოცანაა არსებული ხერხებითა და მეთოდებით მაქსიმალურად მოაცილოს თხევად ღითონს ზემოთ ჩამოთვლილი ყველა მავნე ელემენტი. იგი ვალდებულია ისე წარმართოს

დნობის პროცესი, რომ მსა ფოლადის ქიმიური შედგენილობა და მექანიკური თვისებები აკმაყოფილებდეს სახელმწიფო სტანდარტის მოთხოვნებს; ამასთანავე, პროცესის ეკონომიურობისათვის აუცილებელია გაითვალისწინოს ელექტროენერჯისა და ადამიანის შრომის შემცირება ერთ ტონა წარმოებულ ლითონზე.

6.1.1. დნობის ხერხები რკალურ ღუმელებში

ელექტრორკალურ ფოლადსადნობ ღუმელებში დნობის პროცესი დამოკიდებულია გამოსადნობი ფოლადის ხარისხსა და დანიშნულებაზე. ფოლადის გამოდნობისათვის არსებობს დნობის ტექნოლოგიის ორი ძირითადი მეთოდი: დნობა ნახშირბადიან ანუ ე.წ. ახალ კაჟზე და დნობა ლეგირებული კაჟის გადადნობით. ამასთან, შესაძლებელია დნობის ორივე ხერხის გამოყენება ე.ი. ერთი და იგივე ღუმელში დნობის სხვადასხვა ტექნოლოგიის განხორციელება.

ნახშირბადიან კაჟზე დნობისას გამოიყენება ისეთი ჯართი, რომლის ქიმიური შედგენილობა არ არის ზუსტად დადგენილი და, როგორც წესი, შეიცავს ფოსფორისა და გოგირდის მომატებულ და მალეგირებული ელემენტების (1-3 %) მცირე რაოდენობებს. ასეთი ჯართით ფოლადის გამოდნობისათვის საჭიროა ჩატარდეს დაჟანგვითი პერიოდი, რომლის დროსაც ნახშირბადის პარალელურად იჟანგება და წიდაში გადადის ფოსფორი და ჯართში შექმავალი ზოგიერთი ელემენტი: მანგანუმი, კაუბადი, ქრომი და სხვა.

ნახშირბადიან კაჟზე დაჟანგვითი პერიოდით ჩატარებულ ტექნოლოგიურ პროცესს უწოდებენ დნობას სრული დაჟანგვით. ასეთი დნობა შედგება შემდეგი საფეხურებისაგან; 1. საკაჟმე მასალების მომზადება; 2. დნობისათვის ღუმელის მომზადება ანუ გაწყობა — შეკეთება; 3. კაჟის ჩატვირთვა; 4. კაჟის დნობა; 5. დაჟანგვითი პერიოდი; 6. პირველადი წილის მოხდა; 7. დანახშირბადიანება საჭიროებისამებრ და აღდგენითი წილის შექმნა; 8. აღდგენითი პერიოდი; 9. საბოლოო განჟანგვა და ფოლადის გამოშვება ღუმელიდან.

დნობის ასეთი ხერხით განხორციელებისას ზოგიერთი პერიოდი შეიძლება ერთმანეთს დაემთხვეს, მაგრამ საშუალებას იძლევა ფოლადში მანე მინარეების (ფოსფორის და გოგირდის) შემცველობა სტანდარტით გათვალისწინებულ რაოდენობამდე იქნეს დაყვანილი. ნახშირბადის დაჟანგვა იწვევს ფოლადის დუღილს,

რაც, თავის მხრივ, ხელს უწყობს ლითონის ოპტიმალურ ტემპერატურამდე გახურებას, არადიოთონური ჩახართების წიდაში გადასვლას. დეგაზაციას, თხევად ლითონში წყალბადისა და აზოტის შემცველობის მინიმუმამდე დაყვანას. ელექტროლუმენლში ლითონის დნობისას ზემოთ ჩამოთვლილი პერიოდებისა და რეგლამენტის დაცვით შესაძლებელია დაბალხარისხოვანი ჯართიდან მაღალხარისხოვანი ფოლადის მიღება.

დნობის ასეთი ხერხის უარყოფით მხარედ შეიძლება ჩაითვალოს იმ მცირე რაოდენობით მალეგირებული ელემენტების Si, Mn, Cr-ის და სხვ. დაკარგვა დაჟანგვის პერიოდში, რომლებსაც აუცილებლად შეიცავს ყველა სახის ფოლადის ჯართი.

ლეგირებული კაზმის გადადნობის დროს ჯართი შედგება მალეგირებული ნარჩენებისაგან. ამიტომ კაზმი უნდა შეიცავდეს სტანდარტით გათვალისწინებულ ფოსფორის რაოდენობას. ასეთი დნობისას გამორიცხულია დაჟანგვის პერიოდი, რაც განპირობებულია ჯართში შემავალი მალეგირებული ელემენტების სრული გამოყენებისათვის ანუ თავიდან იქნება აცილებული მალეგირებული ელემენტების დაჟანგვისა და წიდაში გადასვლის პროცესი. რაც უფრო მცირე რაოდენობით დაიკარგება ლეგირებულ ჯართში არსებული მალეგირებული ელემენტები, ბუნებრივია, უფრო მეტად დაიზოგება სხვადასხვა ფეროშენადნობი და შედეგად ფოლადის თვითღირებულება გაცილებით დაბალი იქნება. დაჟანგვითი პერიოდის გამორიცხვა შეუძლებელს ხდის ფოლადის დუღილის პერიოდის განხორციელებას. ეს გარემოება კი ხელს უშლის ლითონის დეგაზაციას. ლითონის დეგაზაციისათვის აუცილებელი იქნება ჩატარდეს სხვა დამატებითი ღონისძიებები. მათგან ერთ-ერთი ითვალისწინებს გადნობის ბოლოს ღუმელის აბაზანაში აიროვანი ჟანგბადი შეყვანას. ეგზოთერმული რეაქციების წყალობით ლითონი სწრაფად გადახურდება (1750—1850 °C) და ამიტომ იჟანგება არა თხევად ლითონში გახსნილი მალეგირებული ელემენტები, არამედ ნახშირბადი, რაც იძულებით დუღილთან ერთად იწვევს ლითონის დეგაზაციას.

ლეგირებული კაზმით დნობისას დაჟანგვითი პერიოდის გამორიცხვის ხარჯზე მცირდება დნობის საერთო ხანგრძლივობა, იზრდება ღუმელის წარმადობა, მცირდება ენერჯის ხარჯი, რაც საერთო ჯამში ამცირებს ამ ხერხით გამოდნობილი ფოლადის თვითღირებულებას ნახშირბადიან კაზმზე გამოდნობილ იგივე ფოლადთან შედარებით და დადებითად მოქმედებს საწარმოს ეკონომიკაზე.

საკაზმე მასალები

ელექტრორკალურ ფოლადსადნობ ღუმელებში გამოსადნობი ფოლადის კაზმს საკმაოდ მკაცრი მოთხოვნები წაყენება. კაზმი შედგება შემდეგი მასალებისაგან: ლითონური ნაწილი, წილის წარმოქმნელები, განმუხანგელები, მალეგირებლები, დამნახშირბადიანებლები.

ლითონური ნაწილი. ელექტრორკალური ფოლადსადნობი ღუმელების კაზმის ძირითადი ნაწილი შედგება ფოლადის ჯართისაგან. საშუალოდ 1 ტ გამოდნობილ ფოლადს სჭირდება დაახლოებით 950 კგ-მდე ლითონის ჯართი. ქიმიური შედგენილობის მხრივ ფოლადის ჯართი სუფთა უნდა იყოს ყურადი ლითონებისაგან. უნდა შეიცავდეს არა უმეტეს 0,05 % ფოსფორს; ელექტროლუმენის კაზმისათვის ძირითადად იყენებენ: 1. მეტალურგიული ქარხნის საამქროების წუნს; სასამოსხმო ნარჩენებს; შეეესებულ სხმელებს; ზოდების გლინვისა და ჭედვის შემდეგ მიღებულ ჩამონატრებს; ლითონის ბურბუშელას და სხვ. 2. გარდა ამისა, ღუმელში იტვირთება ლითონგადამამუშაებელი, უმთავრესად მანქანათმშენებელი ქარხნების ნარჩენები, რომლებსაც ხელშეკრულებით ყიდულობს მეტალურგიური საწარმოები.

რკინის ჯართი არ უნდა იყოს ძალიან დაუანგული ან ზეთიანი. დიდი რაოდენობით დაუანგული ჯართის გამოყენებისას იზრდება წილის მოცულობა, ძნელდება ამოწმვარი ელემენტების რაოდენობის დადგენა, რაც ართულებს სასურველი ქიმიური შედგენილობის ფოლადის მიღებას. ზეთიანი ჯართის გამოყენებისა და დაუანგული ჯართის დნობისას თხევად ლითონში კარგად იხსნება წყალბადი, რომელიც საგრძნობლად აუარესებს მის ხარისხს. ღუმელის ჩატვირთამდე უნდა მოხდეს მძიმე და მსუბუქი ჯართის დოზირება. თუ გამოყენებულია მარტო მსუბუქი ჯართი. (ლითონის ბურბუშელა, თუნუქი, საყოფაცხოვრებო ჯართი და სხვა, რომელთა ნაყარი წონა მცირეა). იგი იკაეებს დიდ მოცულობას და ისე ავსებს ღუმელს, რომ მისი მთლიანი წონა გაცილებით ნაკლებია ღუმელის ტევადობაზე. ამიტომ საჭირო ხდება ჩატვირთული კაზმის ჩადნობა და ახალი ულუფის დამატება. რომ ჩატვირთული ჯართით შეივსოს ღუმელის ოპტიმალური ტევადობა. ხანდახან ერთი დნობისათვის საჭირო ხდება ერთი, ორი და იშვიათად სამი ულუფის ჩატვირთვა. ყოველი დანამატის ჩატვირთვისას საჭიროა ღუმელის გამორთვა, ელექტროდის აწევა, ჯართის დასამატებლად

ლუმელის ან მისი თაღის გაგორება და შემოგორება. ელექტროდების დაშეება და ლუმელის ჩართვა. ეს ოპერაციები მოითხოვს გარკვეულ დროს, რომლის განმავლობაშიც ლუმელში ჩამდნარი ჯართი მყარდება, რაც იწვევს დნობის საგრძნობ გახანგრძლივებას. ეს, თავის მხრივ, აუარესებს ლუმელის ეკონომიკურ მანქენებლებს და რაც მთავარია ლითონის ხარისხს.

მარტო მძიმე ჯართის გამოყენებისას (წუნდებუდი სხმულები, დიდი ზომის ჩამონაჭრები) იზრდება დნობის ხანგრძლივობა, ამიტომ ლუმელის ჩატვირთვა ერთი ოპერაციით რომ დასრულდეს, სასურველია ჩატვირთვის დროს მოხდეს მოუბუქი და მძიმე ჯართის ოპტიმალური შერჩევა – დოზირება.

ლითონური ჯართი იყოფა ორ ჯგუფად: არალეგირებული ანუ ნახშირბადიანი ჯართი (A ჯგუფი) და ლეგირებული (B ჯგუფი).

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არალეგირებული ანუ ნახშირბადიანი ჯართი არ უნდა შეიცავდეს ტყვიას, თუთიას, კალას, განსაკუთრებით კი, ნიკელს, სპილენძს, დარიშხანს, რომლებიც მთლიანად რჩება ლითონში და აუარესებს (ნიკელის გარდა) მის თვისებებს. ფოსფორის დიდი შემცველობა ($>0.05\%$) იწვევს დაჟანგვის პერიოდის გახანგრძლივებას. ამიტომ ჯართი მაქსიმალურად უნდა გასუფთავდეს ფერადი ლითონებისაგან და ცნობილი უნდა იყოს მისი გამოდნობის ტექნოლოგია.

ხარისხოვანი მარკების ფოლადების ფოლადსადნობ ქარხნებში, გარდა საკუთარი წარმოებისა, მოსდით სხვა ქარხნებიდან რამდენიმე ასეული მარკის სხვადასხვა ქიმიური შედგენილობის ფოლადის ჯართი. ზოგი მათგანი ლეგირებულია ისეთი ელემენტებით (ნიკელი, სპილენძი, მოლიბდენი), რომლებიც პრაქტიკულად ან სულ არ იჟანგება ფოლადის გამოდნობისას, ან – ძალიან ძნელად, რის გამოც მათი მოშორება გამდნარი ლითონიდან პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამ ელემენტების შემცველი ლითონური ჯართისაგან უნდა გამოდნეს მარტო მსგავსი ქიმიური შედგენილობის ფოლადები. ამისათვის, ლეგირებული ნარჩენების ჯართი საკაზმე ეზოს ორმოებში ქიმიური ანალიზის მიხედვით უნდა განცალკევდეს, რაც გააადვილებს ყოველი დნობისათვის ჩასატვირთი კაზმის ანგარიშს.

ღრუბლოვანი რკინა, რკინის ჯართის გარდა, თანამედროვე ელექტროლუმელების კაზმში ხშირად გამოიყენება პირდაპირი აღდგენის გზით მიღებული ღრუბლოვანი რკინა ($85-93\% \text{ Fe}$; $0.1-0.8\% \text{ C}$, $0.01-0.03\% \text{ P}$, $0.01-0.07\% \text{ S}$, $2-8\% \text{ SiO}_2$), რომლის გამოყენებისას სხვა უპირატესობებიდან მთავარი ისაა, რომ იგი არ შეიცავს ფერად ლითონებს.

რბილი რკინა. ზოგიერთი ფოლადის გამოსადინობად ჯართში ხშირად გამოიყენება უმეტესად სხვა ფოლადსადნობ აგრეგატში წინასწარი მიზნით გამოდნობილი დაბადინახშირბადიანი ფოლადი ($0.01-0.15 \% C; P$ და $S \leq 0.020 \% ; Ni$ და $Cu \leq 0.2 \% ; Mn \leq 0.3 \%$) ანუ რბილი რკინა. კაზმში რბილი რკინა უნდა იყოს მკირე ზომის ნატურების სახით ($100-1500$ მმ. განიკეპეთის ფარგლებში). რბილი რკინა საგრძნობლად ძვირია. ვიდრე ნახშირბადიანი ჯართი. ამიტომ მისი კაზმში გამოყენება ეკონომიკურად გამართლებულია ფოლადის მხოლოდ რთული ტექნოლოგიით გამოდნობისას (მისი ექსპლუატაციის პირობებიდან გამომდინარე).

ზოგი ქარხნის გამოდნობის ტექნოლოგიური ინსტრუქციები ითვალისწინებს ლითონური ჯართის შეცვლას გადასამუშავებელი თუჯით ($10-20 \%$). ამ შემთხვევაში არ უნდა დაგვევიწყდეს, რომ გადასამუშავებელი თუჯი შეიცავს დიდი რაოდენობით ფოსფორსა და გოგირდს, რომელთა მოშორება მოითხოვს დამატებითი ღონისძიებების ჩატარებას. ამ მიზნით, თანამედროვე ღუმელებში დნობისას ფართოდ იყენებენ ჟანგბადს და წინასწარ დამუშავებულ გადასამუშავებელ თუჯებს.

მეტალიზებული რკინის მადნის ნედლეული. თანამედროვე ელექტრომეტალურგიულ წარმოებაში წარმატებით გამოიყენება რკინის მადნის მეტალიზებული გუნდები ($90-95 \% Fe$ საერთო, $85-90 \% Fe_{\text{ფლ.}}$). როგორც ხერხითაც არ უნდა იყოს მიღებული მეტალიზებული გუნდები, ისინი შეიცავენ მნიშვნელოვანი რაოდენობით რკინის ქვეჟანგს, რაც გამოწვეულია გუნდების მიღების ტექნოლოგიური სქემით. სადაც მთელი რკინის აღდგენა მადნიდან იწვევს ამ როცისის გახანგრძლივებას და მკვეთრად ამცირებს დანადგარის წარმადობას. ამიტომ მეტალიზებული რკინის გუნდის ნედლეულის ძირითად მახასიათებლად ითვლება მეტალიზების ხარისხი ანუ აღდგენილი რკინის რაოდენობის შეფარდება მის საერთო რაოდენობასთან.

რადგან მეტალიზებული რკინის გუნდის ნედლეული შეიცავს რკინის ქვეჟანგის საკმაო რაოდენობას, ამიტომ მიზანშეწონილია თვითონ შეიცავდეს მისი აღდგენისათვის საჭირო რაოდენობის ნახშირბადს $0,1-0,3 \%$ -ის ფარგლებში. საჭიროების შემთხვევაში ღუმელში გარკვეული ოდენობით ამატებენ გრაფიტს ან კოქსს. კაზმში რკინის მადნის მეტალიზებული გუნდების გამოყენებას გარდა იმისა, რომ აქვს დიდი უპირატესობა, არ შეიცავს ფერად და ძვირფას ლითონებს (სპილენძი, ნიკელი და სხვა). მათი შეტანა ღუმელში შეიძლება განუწყვეტლივ ღუმელის გამორთვის გარეშე (გუნდების დიამეტრია $5-10$ მმ). უფრო დაწვრილებით მეტალი-

ზებული რკინის მადნის ნედლეულის კაჟში გამოყენების შესახებ. იხილეთ შემდგომი ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის აღწერისას.

წილის წარმომქმნელები. ფუქიამონაგიან ელექტრორკალურ ფოლადსადნობ ღუმელებში ფუქე წილების შესაქმნელად იყენებენ კირქვას. ახლად გამომწვარ კირს, მლღობ შპატს, შამოტის აკურის ნამტვრევებს ან ქვიშას. შუაყვამონაგიან ღუმელებში - ქვიშას, შამოტის ნამტვრევებს და გამომწვარ კირს.

ახლად გამომწვარი კირი. (CaO) წარმოადგენს ფუქე წილების ყველაზე მნიშვნელოვან შემადგენელ ნაწილს. მეტალურგიულ ქარხნებში იგი უმთავრესად მიიღება შახტურ ან მბრუნავ ღუმელებში კირქვის (CaCO_3) გამოწვით $1100-1300^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე. გამოწვის შედეგად კირქვა იშლება შემდეგი რეაქციით $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$. ჩვეულებრივ, გამომწვარი კირი შემდეგი შედგენილობისაა 88-93 % CaO; 2,6 % MgO; 2 %-SiO₂; 3 % (FeO+Al₂O₃). არა უშეტეს 0,1 % S-სა. განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა გოგირდის შემცველობას გამომწვარ კირში, რადგან მისი მაღალი შემცველობა იწვევს ფოლადის განგოგირდების პროცესის გახანგრძლივებას და აძნელებს ლითონში გოგირდის შემცველობის დაბალ ზღვრამდე დაყვანას. საერთოდ კირქვაში გოგირდი ცოტაა, მაგრამ გამოწვისას მასში გადადის სათბობის (კოქსის) გოგირდი. დაბალგოგირდიანი კირის მისაღებად შახტურ და მბრუნავ ღუმელებში საწვავად კოქსის ნაცვლად იყენებენ ბუნებრივ აირს, რომლის მეშვეობითაც გარდა დაბალგოგირდიანი შემცველობისა ლებულობენ თანაბრად გამომწვარ კირს და ეს პროცესი კარგად რეგულირდება აირის ხარჯით კირქვის ნატეხების ზომისაგან დამოკიდებულებით. სხვა მინარევების რაოდენობა უნდა შეიზღუდოს სხვადასხვა მოსაზრებების გამო. მაგალითად, SiO₂-ის მომატებული რაოდენობა კირქვაში შეამცირებს CaO-ს წილს, რაც დნობისას გაზრდის კირის, საწვავისა და ელექტროენერჯის ხარჯს. წილის რაოდენობას და საჭირო გახდება ღუმელის თბური დატვირთვის (სიმძლავრის) გაზრდა, რათა გამოდნობის პროცესი არ გაჭიანურდეს. MgO-ს რაოდენობის გაზრდა იწვევს წილის სიბლანტის გაზრდას, რაც გამოიწვევს მღღობი შატის ხარჯის მომატებას და, საერთოდ, წილის სიბლანტის მომატება მკვეთრად ამცირებს მასა და ლითონს შორის მიმდინარე ყველა რეაქციის სიჩქარეს. FeO-ს რაოდენობის გაზრდა წიდაში ანელებს განგოგირდებას და ამცირებს მის ხარისხს, ამიტომ გამომწვარ კირში მისი რაოდენობა უნდა იყოს, რაც შეიძლება დაბალი. საერთოდ, ახლად გამომწვარი კირის ხარისხი ფასდება მასში გოგირდის, კაჟიწის

და კირში CaO -ს შემცველობით. პირველი ორი უნდა იყოს რაც შეიძლება მიწიმაღური, მესამე – კალციუმის ჟანგი კი მაქსიმალური.

ელექტრორკალურ ღემელებში ფოლადის დნობისას გამოიყენება მხოლოდ ახლად გამომწვარი კირი, ვინაიდან ჰაერიდან იგი ხარბად შთანთქავს ტენს და წარმოქმნის ჩამქრალ კირს ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$). ეს ნაერთი კი ფოლადის დნობისას მაღალ ტემპერატურაზე იმლება წყალბადად და ჟანგბადად. რომლებიც შთანთქმებიან თხევადი ფოლადის მიერ. წყალბადის ლითონში გადასვლა კი მეტად არასასიამოვნო პროცესია. რადგან ის ფოლადის სხმულისა და მის პროდუქციის ხარისხს საგრძნობლად აუარესებს (იხ. აირების ხსნადობა ფოლადში). კირის ტენიანობის ლაბორატორიული მეთოდებით განსაზღვრის გარეშე. შეუიარაღებელი თვალითაც კარგად ჩანს, როგორც კი გამომწვარი კირი შთანთქავს ტენს, მაშინვე იწყებს დაშლას, რის შედეგადაც წარმოიქმნება კირის ფხვნილი. ასეთი ფხვნილის გამოყენება დნობისას ყოველად დაუშვებელია. დადგენილია, რომ კირქვის გამოწვის მაღალი ტემპერატურა უფრო მდგრადს ხდის გამომწვარ კირს ჰაერის ტენის მიმართ.

კირქვა (CaCO_3). გადნობის და ხანდახან დაუანგვით პერიოდში შესაძლებელია კირქვის გამოყენება. რადგან კირქვა ჰიგროსკოპიული არ არის ე.ი. არ იერთებს წყალსა და ჰაერის ტენს. ამიტომ მას ღუმელში არ შეაქვს წყალბადი. გარდა ამისა, გახურებისას კირქვა (შეიცავს არა ნაკლებ 97 % CaCO_3 -ს ანუ 54 % CaO -ს) იმლება კირად და ნახშირორჟანგად, რის გამოც ხდება ლითონისა და წიდის არევა (რეაქციები თხევად ლითონსა და წიდას შორის ჩქარდება ე.წ. კირქვული დუღილით თანაბრდება ლითონის ტემპერატურა და გარდა ამისა CO_2 , როგორც დამჟანგველი, ხელს უწყობს მინარეების (განსაკუთრებით ნახშირბადის) დაჟანგვას. დნობისას კირქვის გამოყენება უფრო მიზანშეწონილი იქნებოდა, ვიდრე გამომწვარი კირისა, მის დაშლაზე რომ არ იხარჯებოდეს, სითბოს დიდი რაოდენობა ანუ დიდი რაოდენობის ელექტროენერგია. ამ ძირითადი ეკონომიკური მანიევრების გამო, ელექტროღუმელებში ფოლადის წარმოებისას გამოიყენება გამომწვარი კირქვა ე.ი. კირი.

მლღობი შპატი (CaF_2). როგორც უკვე ავლნიშნეთ, თხევადდენადი წიდა აჩქარებს რეაქციებს წიდასა და ლითონს შორის. ამიტომ მაღალფუძიანობასთან ერთად საჭიროა წიდის თხევადდენადობის შენარჩუნება. მლღობი შპატი ამ მხრივ ითვლება შეუცვლელ მასალად. იგი ფუძიანობის შეუმცირებლად საგრძნობლად ზრდის წიდის თხევადდენადობას. ეს გარემოება კი განსა-

კუთრებით უწყობს ხელს გოგირდის მოშორებას თხევადი ლითონიდან. ელექტრორკალურ ღუმელებში ფოლადის დნობისას გამოიყენებულ მლღობ შპატს უნდა აქონდეს შემდეგი შედგენილობა: 85–95 % CaF_2 , არა უმეტეს 3.0 % SiO_2 და არა უმეტეს 0.2 % S.

ქვიშა (SiO_2). ამცირებს წიდის დნობის ტემპერატურას და ზრდის ფუძე წიდის თხევადენადობას. მაგრამ დაბლა ხწვევს მის ფუძიანობას. ამიტომ მისი გამოყენება ფუძემონაგიან ღუმელებში შეზღუდულია. მაშინ, როცა მუაგემონაგიან ღუმელებში წიდის მთავარი წარმომქმნელია. სოკიერო ქარხანაში ფუძემონაგიან ღუმელებში აღდგენით პერიოდში იყენებენ ქვიშას. განსაკუთრებით ქრომომაგნეზიტური თაღებით მუშაობისას. უჟანგავი ფოლადების დნობისას, როცა წარმოიქმნება ხქელი წილები, ხშირად ხმარობენ შამოტის აგურის ნამტვრეკეებს (60 % SiO_2 , 35% Al_2O_3).

დამუხანგველები. ჟანგითი პროცესების დანიარებისათვის (უმთავრესად, ფოსფორის და ნახშირბადის ამოსაწვავად) გამოიყენება რკინის მადანი, აგლომერატი, რკინის ხენჯი და აიროვანი ჟანგბადი. ნახშირბადიანი კაშით დნობისას სხვა დამუხანგველებზე უფრო მეტად გამოიყენება რკინის მადანი. დაჟანგვის პერიოდში მისი დამატება ცალკეული ულუფების სახით იწვევს აბაზანის ერთგვაროვან დუღილს თხევადი ლითონის ტემპერატურის საგრძნობი ზრდის გარეშე. რასაც გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ფოსფორის დაჟანგვისა და მისი მოშორებისათვის. მადანის ძლევენ ღუმელში როგორც კაშითან ერთად, ასევე ამატებენ დაჟანგვის პერიოდში. რადგან დაჟანგვის პერიოდში უკვე შექმნილია წიდა, ამიტომ რკინის მადნის ზომები, მისი ნატროცენება ისეთი უნდა იყოს, რომ თავისუფლად ჩაიძიროს წიდაში და შეეხოს თხევად ლითონს. მაგრამ ამავე დროს, არც ისეთი მსხვილნაკროვანი, რომ გამოიწვიოს თხევად ლითონის აქტიური რეაქცია და ამოფრქვევა. პრაქტიკული გამოცდილებით დადგენილია, რომ რკინის მადნის ზომები სასურველია იყოს 50–100 მმ-ის ფარგლებში. გარდა ამისა, რკინის მადანი სუფთა უნდა იყოს ფუჭი ქანებისაგან, განსაკუთრებით მინიმალური ოდენობით უნდა შეიცავდეს გოგირდსა და ფოსფორს დახდევული რომ ვიყოთ ლითონის ფეთქებადი ამოფრქვევისგან. რასაკვირველია, ის მადანია უკეთესი, რომელიც ფუჭი ქანების, გოგირდისა და ფოსფორის მცირე მოცულობებთან ერთად, შეიცავს რკინის ჟანგულების დიდ რაოდენობას.

ხანდახან რკინის მადნის მაგიერ გამოიყენება რკინის ხენჯი და აგლომერატი. მაღალნახშირბადიანი ფოლადის ხენჯი ძალიან

კარგი დამუშავებელია (შეიცავს მცირე რაოდენობის გოგირდსა და ფოსფორს). ამჟამად დროს. საერთოდ არ შეიცავს ფუჭ ქანებს. მაგრამ ნაყარი წონის სიმცირის გამო ნაწილი იბლანდება წილის ზედა ფენებში, რის გამოც მთლიანად ექვარ აღწევს თხევადი ლითონის ზედაპირს. ბევრ ქარხანაში რკინის ხენჯს აბრიკეტებენ. რის გამოც მისი გამოყენება ჟანგვის პერიოდში უფრო ხელსაყრელია, ვიდრე რკინის მადნისა. გარდა ამისა, წარმოებაში რკინის ხენჯის რაოდენობის სიმცირის გამო და ყველა დნობის დაქანგვითი პერიოდების ჩასატარებლად იგი საკმარისი არ არის. თანამედროვე ელექტროლუმებში ფოლადის დნობისას ეს საკითხი გადაწყვეტილია ჟანგბადის ფართო გამოყენებით.

დნობის დაქანგვით პერიოდში ფოსფორის მოშორების შემდეგ და აგრეთვე გადადნობით დნობის ჩატარებისას. ნახშირბადის სწრაფი ამოწევისა და ტემპერატურის აწვევისათვის. გამოიყენება აიროვანი ჟანგბადი. აიროვანი ჟანგბადი (99.5 % O₂) პირდაპირ მიეწოდება თხევად აბაზანას გარეკეული წნევით. უსაფრთხოების თვალსაზრისით. შესაბერი ჟანგბადის ტენიანობა არ უნდა აღემატებოდეს 1 გ/მ³-ზე.

განმუშავებლები და მალეგირებლები. თხევადი ფოლადის განმუშავებლებად გამოიყენება: ფერომანგანუმი, ფეროსილიციუმი, ალუმინი, ფეროტიტანი, სილიკომანგანუმი, სილიკოკალციუმი, იშვიათი მიწათა ლითონები, სხვადასხვა ლიგატურები. კომპლექსური განმუშავებლები. მალეგირებლებად გამოიყენება: ფერომანგანუმი, ფეროსილიციუმი, ფეროქრომი, ფეროვანადიუმი, ფეროვოლფრამი, ფეროშირლიბდენი, ფერონიობიუმი, ფეროტიტანი, ფერობორი, ნიკელი, კობალტი, ალუმინი და სხვა.

ბუნებრივია, რომ იმ ელემენტების ნაერთები, რომელთაც უფრო მეტი სწრაფვა აქვთ ჟანგბადთან. (დნობის მოცემულ პირობებში). ვიდრე რკინას. შეიძლება გამოიყენონ როგორც განმუშავებლებად. ასევე მალეგირებლებად (ამ შემთხვევაში უნდა გაითვალისწინოს განმუშავებლ-მალეგირებლების ღირებულება გამოსადნობი ფოლადის დანიშნულებასა და ხარისხთან ერთად).

განმუშავებლებიც და მალეგირებლებიც უნდა აკმაყოფილებდნენ მთელ რიგ მოთხოვნებს. რომელთაგან განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შემდეგი:

1. ფეროშენადნობის გამოყენებისას სასურველია მალეგირებელი ელემენტი მასში, რაც შეიძლება მეტი რაოდენობით იყოს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მალეგირებულ ელემენტთან ერთად. თხევად ლითონში შეგვყავს დიდი რაოდენობის რკინაც, რაც გამოიწვევს ლუმელის თბური ხარჯის გაზრდას. რასაკვირველია.

ისეთი ძნელდნობადი ელემენტების ფეროშენადნობებში, როგორიცაა ფეროვოლფრამი, ფერომოლიბდენი, ვოლფრამის და მოლიბდენის შემცველობის გაზრდა გამოიწვევს დნობის გახანგრძლივებას, ამიტომ ფეროშენადნობებში მათი „რაც შეიძლება მეტი“ შემცველობა არ ივარგებს.

ისეთი ელემენტების გამოყენებისას ყოვლადის ლეგირების ან განუანგვისათვის, რომელთა კუთრი წონა რამდენჯერმე უფრო ნაკლებია, ვიდრე რკინისა, მაშინ მათი შემცველობის გაზრდა ფეროშენადნობებში მიზანშეწონილი არ არის. რადგან ის არ ნაიძირება თხევად ლითონში. არ გაიხსნება მასში და დაიჟანგება ატმოსფეროს ან წიდაში გახსნილი ჟანგბადით.

2. შენადნობები დასაშვებ ზღვრებამდე სუფთა უნდა იყოს მავნე მინარევებისაგან. ეს განსაკუთრებით საეკულისხმია, რადგან როგორც მალეგირებლები, ისე განმუანგველები აბაზანაში შეჰყავთ დნობის ბოლოს, როცა მავნე მინარევების მოშორება თხევადი ლითონიდან ან ძალიან ძნელია, ან შეუძლებელი.

3. შენადნობის ზომები უნდა იყოს განსაზღვრული. დიდი ნატეხები გვიან გადნება და გაახანგრძლივებს დნობას, ფხეიერი შეიძლება გაიბლანდოს წიდაში, რაც შეამცირებს მისი ათვისების კოეფიციენტს.

დამნახშირბადიანებლები. მათ მიეკუთვნებათ ისეთი მასალები, რომლებიც შეიცავენ ბევრ ნახშირბადს. ისინი შეჰყავთ ან კაზმთან ერთად (კოქსი, ელექტროდების ნამსხვრეეები. თუ დნობა მიდის ნახშირბადიან კაზმზე, დაჟანგვითი პერიოდის გამოყენებით, მაშინ შეიძლება თუჯის გამოყენებაც), ან თხევადი ლითონის ზედაპირზე (შეიძლება აღდგენით პერიოდშიც), რომლიდანაც წინასწარ ხდია წიდას. ამ შემთხვევაში გამოიყენება მხოლოდ დამნახშირბადიანებლები. იშვიათად დამნახშირბადიანებლებლად გამოიყენება (სიძვირის გამო) ხის ნახშირი ან ჭვარტლი. დამნახშირბადიანებლები არ უნდა შეიცავდნენ: მინარევებს, გოგირდს, ტენს, რომლის მოცილებისთვის მათ გამოყენებამდე წინასწარ ახურებენ;

საკაზმე მასალების მომზადება ღს(ო)ბისათვის

კაზმის ძირითად ნაწილს შეადგენს ლითონური ჯართი. ლითონური ჯართი სადნობ საამქროს მიეწოდება დამუშავებული და დახარისხებული. ეს ნიშნავს, რომ დიდი ნატრები დატრული უნდა იყოს ღუმელის შესაბამის ზომებად. ხოლო ლითონის ბურბუშელა და მსებუქი ნატრები – დააკეტებული. რომ გაისარდოს ჯართის მოცულობითი წონა ღუმელის ჩატვირთვის პერიოდის შემცირების მიზნით. ლითონური ჯართი მაგნიტური ამწეებით იტვირთება ჩასატვირთ კალათებში – ბადიებში. ჩატვირთვისას აფეთქების თავიდან აცილებისათვის დაუშვებელია კალათში მოხვდეს პერმეტული ტურტული. კაზმის მომზადებისას ერთ-ერთი სანასუხისმგებლო ოპერაციაა მისი აწონა. რაზეც ძირითადად დამოკიდებულია ნადნობის ნორმალური წონა. ნადნობის ოპტიმალური წონა გარანტიაა ფოლადის ქიმიურ ანალიზში მოსახვედრად. რაც შეუძლებელია არასრული წონის ნადნობის ან გადატვირთული ნადნობის შემთხვევაში. რადგან განსუხავებულები და მალევირებული შენადნობები იანგარიშება ნორმალური წონის დნობაზე. დნობის არანორმირებული წონა ორივე შემთხვევაში თხევადი ლითონის დიდ დანაკარგებს იძლევა წუნის სახით. იმ ლითონს, რაც ციცხვში არ ჩაეტევა. გარდა წუნდებული პროდუქციისა, მოწყობილობა გამოჰყავს მწყობრიდან. მცირეწონიანი დნობების შემთხვევაში ქიმიური ანალიზის გარდა, წუნი ლითონის შეუვსებელი სხმულების სახითაც მიიღება. თუ ღუმელში კაზმის და მასალების ჩატვირთვისას მოხვდება ტენი ან წყალი, მაშინ ისინი სწრაფად ორთქლდებიან და ელექტრულ რკალში სწრაფად განიცდიან დისოციაციას. მიღებული ატომური წყალბადი კარგად იხსნება თხევად ლითონში. ეს კი იწვევს ფლოკენების წარმოქმნას, რაც საგრძნობლად აუარესებს მიღებული ფოლადის ხარისხს. ელექტრორკალურ ღუმელში დნობა იწყება კაზმის ჩატვირთვით. ჩატვირთული კაზმი თანდათან ხურდება და ამიტომ ტენი პრაქტიკულად მთლიანად ორთქლდება კაზმის გადნობის დაწყებამდე. ამასთან, თუ დნობა მიმდინარეობს დაჟანგვის პერიოდით. ლითონში გახსნილი წყალბადი აბაზანის დუღილისას გამოიყოფა თხევადი ლითონიდან. ამრიგად, როცა ვლაპარაკობთ ტენიდან თხევად ლითონში წყალბადის გადასვლაზე, უმთავრესად ვგულისხმობთ დანამატებით შეტანილ ტენს, რომლებიც დუღილის პერიოდის შემდეგ შევყავს თხევად ლითონში. ასეთებია: მლღობი შპატი.

მალეგირებელი ფეროშენადნობები, დაფქული კოქსი, ფეროსი-
ლიციუმი და სხვა. ამიტომაც საჭიროა ამ მასალების გახურება
მათ გამოყენებამდე. საერთოდ, უნდა გახურდეს ღუელილის
პერიოდში გამოყენებული რკინის მადანიც, რადგან მის მიერ
შეტანილი წყალბადი შეიძლება მთლიანად არ გამოიყოს ლითონის
ღუელილისას. მაღალხარისხოვანი ფოლადების გამოსადნობ საამქ-
როებში მასალის გახურებისათვის გამოიყენება აირის ან ნავთობის
ღუმელები, რომლებიც უმთავრესად სადნობ ბაქნებსეა დაყენე-
ბული. სხვადასხვა მასალა ხურდება სხვადასხვა ტემპერატუ-
რამდე. მაგალითად, ფეროშენადნობები 800-900 °C. იმისათვის რომ,
არ გართულდეს ცხელი ფეროშენადნობების შეტანა სადნობ
ღუმელებში, ისინი ხურდებიან სპეციალურ როყვებში, რომლებსაც
ნამტვირთავი მანქანა ნაცლის ღუმელში და ფეროშენადნობი
მოხვდება თხევადი ფოლადის აბაზანაში. დაფქული მასალების
მომზადება დნობისათვის ხდება სპეციალურ განყოფილებებში.
მაგნიტიტის, შამოტის, ფეროხილიციუმის, კოქსის და სხვა მასა-
ლებს დაფქვის წინ ახურებენ. დამზადებული მასალა გადააქვთ
ღუმელებთან ან სპეციალურ სათავსოებში და იქიდან ხარჯავენ.
ზემოთქმულის მიუხედავად, მაინც აუცილებელია დაფქული
მასალების ტენიანობის ყოველდღიური გასინჯვა, ხოლო გამომწვა-
რი კირი ცვლაში ერთხელ მაინც უნდა გაისინჯოს ტენიანობაზე.
დიდი ჰიგროსკოპულობის გამო.

თ ა ე ი IV

ღუმელის მომზადება და ბაჟყობა დნობისათვის

ფოლადის დნობისას საქმე გვაქვს თხევადდენად, მაღალ
ტემპერატურამდე გახურებულ ქიმიურად აქტიურ წიდასა და
ლითონთან, რომლებიც მოქმედებენ ღუმელის ამონაგზე და
აზიანებენ მას. ძირითადად ეს ხდება აბაზანაში წიდას დონეზე.
ღუმელის ფერდობზე. გარდა ამისა, ხშირია ღუმელის ქვედის
დაზიანებაც მძიმე წონის ჯართის ქვედზე დაყრის შემთხვევაში.
თხევადი ლითონისა და წიდას ზემოქმედებით ქვედს უნდება
ორმოები და იგი ხშირად დადგენილ გრაფიტამდე საჭიროებს
რემონტს. ქვედი შეიძლება დაზიანდეს ელექტროდების არასწორი
მართვის შედეგად. დაზიანებული ქვედი საშიშია, რადგან შეიძლება
მთელი დნობა დაიკარგოს ქვედის გაჭრის შემთხვევაში და

გამოიწვიოს ელექტროდუმელის ხანგრძლივი მოცდენები. ზემოთ ნამოთვლილი მიწესების გამო, ყოველი დნობის შემდეგ ყურადღებით უნდა მოხდეს ღუმელის შემოწმება. ამისათვის ღუმელი დნობის შემდეგ იწმინდება წიდისა და ნარჩენი ლითონისაგან. უკეთ რომ გამოინდეს ღუმელის ყველა დაზიანებული ნაწილი. ღუმელის წიდისა და ნარჩენი ლითონისაგან გაწმენდა ხდება რკინის სპეციალური ხელეკრებით. იმ შემთხვევაში, როცა ქვედი დაზიანებული არ არის, ხდება ღუმელის ფერდობების შეკეთება იმ დონეზე, რომელზეც წიდა ეხებოდა ამონაგს. იგი ყველა შემთხვევაში ოდნავ მაინც დაზიანებულია. დაზიანების ხარისხი დამოკიდებულია წინა დნობის პროცესის ტექნოლოგიაზე: მაღალტემპერატურული დნობა, აქტური წიდეები და სხვა.

ღუმელის ქვედის დაზიანების შემთხვევაში საჭიროა უფრო მძიმე სამუშაოების ჩატარება. რა დაზიანებებთან შეიძლება გვეხვდეს საქმე. შეიძლება მოხდეს ქვედის დაღუღება ე.ი. თუ არ მოხდა წინა დნობის წიდის მთლიანი მოცილება, მაშინ დარჩენილი წიდეები ერთმანეთს დაედუღება. რაც გამოიწვევს ღუმელის მოცულობის შემცირებას. ლითონის დონე იწვევს ზევით და წარმოიქმნება ღუმელის სღურბლიდან ლითონის გადმოსვრის საშიშროება. გარდა ამისა, რადგან თხევადი ლითონის დონე ღუმელში მაღალია, ღუმელიდან ლითონის გადმოსვრის საშიშროების გამო ძნელდება ღუმელის გადმოხრა სამუშაო ფანჯრისაკენ და წიდის მოხდა. ავარიის თავიდან აცილების მიზნით, არ შეიძლება წინა დნობის წიდეების დატოვება ღუმელში. მაგრამ თუ ეს მოხდა, საჭიროა ჩატარდეს დნობა ნახშირბადიანი კაშითა და დაჟანგვის პერიოდით, ხოლო მადანი ქვედზე კაშმის ჩატვირთამდე დაიყაროს. ამასთან, დნობა უნდა ჩატარდეს შედარებით მაღალ ტემპერატურაზე. ქვედზე დაყრილი მადანი დუღილის პერიოდში მოქმედებს ქვედზე ნარჩენულ წიდაზე და შლის მას.

შეიძლება მოხდეს პირიქითაც. ღუმელში წინა დნობის ჩარჩენილი წიდა ეღენოს ქვედის ცეცხლგამძლე მასალას და დაბლა სწევს მის ცეცხლმედეგობას. გარდა ამისა, როგორც ცნობილია, მაღალფუძიანი წიდეები გაცივებისას იშლება (მასალის ალოტროპიული გარდაქმნის გამო). ამიტომ, როცა ღუმელს აჩერებენ ხანგრძლივად (მაგალითად, ავარიული შეკეთებისათვის) ამონაგში გაუღენთილი წიდა იშლება და შლის ამონაგსაც. ეს კი იწვევს ქვედის ცეცხლგამძლე ამონაგის შეთხელებას, რაც, თავის მხრივ, წარმოქმნის ქვედის გაჭრის საშიშროებას. რა დონე იხმარება ამ შემთხვევაში? ღუმელის ქვედს კარგად წმენდენ წიდისა და ნარჩენი ლითონისაგან და მასზე ყრიან ცეცხლგამძლე მასალის ფხენილს.

კარგად თუ არ იქნება გაწმენდილი ქვედი წიდისა და ნარჩენი ლითონისაგან. მაშინ მათზე დაყრილი ცეცხლგამძლე მასალების ფხვნილი არ შეეცხოება ქვედს. გადნება თუ არა ნარჩენი წიდა და ლითონი ისინი მასზე დაყრილ ცეცხლგამძლე მასალასთან ერთად ამოტივტივდებიან გამდნარი ლითონის ზედაპირზე.

შესაძლებელია აგრეთვე, ქვედზე წარმოიქმნას ორმო. მის წარმოშობის მიზეზებზე უკვე იყო ზემოთ ლაპარაკი. მიუხედავად იმისა, რომ ელექტრორკალური ღუმელებიდან თხევადი ლითონის გამოშვება ხორციელდება ღუმელის გადაყირავეებით, ქვედზე წარმოქმნილი ორმოდან თხევადი ლითონი და წიდა მთლიანად არ გადმოიდვრება. როგორც კი გამოშვების შემდეგ შეიმჩნევა, ქვედზე ორმო მასში ჩარჩენილი თხევადი ლითონითა და წიდით, სწრაფად უნდა შეკეთება ღუმელის გამოსაშვები მხარის ყვერდოებს. ორმოში დარჩენილ ჯერ კიდევ თხევად ლითონს დააყრიან კოქსს, რომელიც გაიხსნება თხევად ლითონში და ამით დაიწვეს მისი დნობის ტემპერატურა, ღუმელს ისევ გადააყირავებენ გამოსაშვები ღარისკენ, დააყოვნებენ ცოტა ხანს, რათა ორმოდან გადმოსული ლითონი გაიყინოს ფერდოსე და შემდეგ ღუმელს გადააყირავებენ საშუალო ფანჯრისკენ და რკინის ხელკეტებით კარგად მოსინჯავენ ორმოს. თუ მასში კიდევ არის ჩარჩენილი ლითონი, დაწნეხილი პაერთ ან ქანგბადით ამოწვევენ, ამოასუფთავენ ორმოს და შემდეგ შიგ ჩაყრიან ცეცხლგამძლე მაგნიტის აგურის პატარა ნატეხებს და იმავე მასალის ფხვნილს. ამის შემდეგ, დნობა უნდა ჩატარდეს არასაპასუხისმგებლო მარკის ყოვლადის გამოდნობით და თანაც რაც შეიძლება დაბალ ტემპერატურაზე, დუღილის პერიოდის გარეშე, რომ მოხდეს ქვედის კარგი შედუღება.

საერთოდ, ღუმელის როგორც ყვერდოების, ისე ქვედის შეკეთება უნდა განხორციელდეს, რაც შეიძლება სწრაფად. ლითონის გამოშვებისთანავე, მაღალ ტემპერატურაზე, რათა მოხდეს ახლადჩაყრილი ცეცხლგამძლე მასალის მიდუღება ღუმელის ამონაგთან. რადგან მცირე და საშუალო ტევადობის ღუმელების (25 ტონამდე) შეკეთება ჯერ კიდევ ყველგან მთლიანად მექანიზებული არ არის, ამიტომ ღუმელის შეკეთების პროცედურის შესრულება ხელით ძალიან ძნელია. მეფოლადეებს უხდებთ უშუალოდ გავარეარებული ღუმელის საშუალო ფანჯრიდან ნიჩბებით ცეცხლგამძლე მასალების შეყრა ყვერდოებზე და ზოგჯერ ქვედზე. წინა კედლების შეკეთება კი, რომლებსაც მეფოლადეები ნიჩბებით ვერ მიუდგებიან, სრულდება სპეციალური თეფშებით, რომლებიც დადუღებულია ლითონის გრძელ ძეგლებზე დიდი ღუმელების შეკეთება უკვე მექანიზებულია. მექანიზმები

ცეცხლგამსლე მასალების შექვემშეული საერის საშუალებით ფხენილს პირდაპირ აყრიან ფერდოებს და ქვედა. თანამედროვე გასაწყობი მანქანები (ტორკრეტმანქანები), რომლებიც ადჟურვილია ლენტური ტრანსპორტიორებით, საშუალებას იძლევიან 10-15 წუთში დნობის გაშვებასთან ერთად მაღალი ტემპერატურის პირობებში გაეწყოს დნობაში მონაწილე ყველა მასალა. შემჭიდროებულ ვადებში ჩატარებული ეს პროცესი ხელს უწყობს ფხეიერი მასალების კარგად შედუღებასა და ღუმელის წარმადობის გაზრდას.

თ ა ვ

კაზმის ჩატვირთვა

ფოლადის გამოდნობისას ყველაზე ხანგრძლივ პერიოდს წარმოადგენს გადნობის პერიოდი. ამიტომ კაზმის სწრაფი გადნობისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება იმას, თუ როგორი შეფარდებით არის აღებული მძიმე, საშუალო და მსუბუქი წონის ჯართი დნობისათვის და როგორ არის იგი განლაგებული ღუმელში. კაზმის ღუმელში ჩატვირთვის ორი ხერხი არსებობს. ერთი როფებით და მეორე ჩასატვირთი კალათით (ბადიით). როფებით ჩატვირთვა დიდი ხანია რაც უარყოფილია და შემორჩენილია მხოლოდ, ძველ, მცირე ტევადობის ღუმელებზე. კალათით ჩატვირთვის უპირატესობა იმაში გამოიხატება, რომ ჩატვირთვის მთელი პროცესი, რა ტევადობის ღუმელიც არ უნდა იყოს, გრძელდება 5-8 წუთს მაშინ, როცა როფებით 25-ტონიანი ღუმელის ჩატვირთვას სჭირდება 45-55 წუთი. გარდა ამისა, კაზმის კალათში ისე განალაგებენ, როგორც ღუმელში უნდა იყოს განლაგებული. როფებით ამის გაკეთება ძნელია, თუმცა ყოველი ღონე უნდა იხმარონ, რომ კაზმი სასურველი განლაგებით მოათავსონ ღუმელში. კალათით ღუმელში ჩატვირთვისას მას აეხდება თალი და ამის შემდეგ ან ღუმელი გადაადგილდება სამუშაო ბაქნისკენ თალის ქვემოდან, ან თალი გადაადგილდება საჩამოსხმო მალისაკენ და ისე ხდება კაზმიანი კალათის ღუმელში ჩაშვება და ჩატვირთვა. როფებით კაზმის ჩატვირთვისას ღუმელი და თალი უძრავია და ჩატვირთვა ხდება სამუშაო ფანჯრიდან.

კაზმის სწრაფი ჩატვირთვა საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ ის სითბო, რომელიც დაგროვილია ღუმელის ამონაგში და ამით შემცირდეს დნობის ხანგრძლივობა, ელექტროენერჯისა და

ელექტროდების ხარჯი, ამასთანავე გაგზარდოთ (ექცხლგამსკე ამონაგის მედეგობა.

როგორ უნდა იყოს ჯართი განლაგებული ჩასატვირთ კალათაში. რომ მან ჩატვირთვისას არ დააზიანოს ღუმელის ქვედი და კედლები, მოხდეს მისი სწრაფი გადნობა და რაც შეიძლება მაღალი იყოს მალეგირებელი ელემენტების ათვისების კოეფიციენტი? როგორც ცნობილია, მარტო მძიმე ჯართის ჩატვირთვისას ელექტროდები სწრაფად ვერ ჩაადნობენ ჰებს ჯართში და ამიტომ რკალის მიერ გამოყოფილი სითბოს დიდი რაოდენობა (რადგან რკალი გარშემორტყმული არ არის ჯართით) იხარჯება არა მის გადნობაზე, არამედ ხმარდება თაღის და კედლების გახურებას, რაც იწვევს მათი საექსპლოატაციო პერიოდის შემცირებას. მსუბუქი ჯართის (რკინის ბურბუშელა) გამოყენებისას, ელექტროდები სწრაფად ჩაადნობენ გუბებზე ჯართში. ელექტროდები შეკრავენ რკალს ჯერ კიდევ ლითონით დაუფარავ ქვედთან (იგი გაუღწიონილია ლითონით) ან გამდნარი ლითონის თხელ ფენასთან. ორივე შემთხვევაში მოსალოდნელია ქვედის ძლიერი დაზიანება. გარდა ამისა, მსუბუქი ჯართის ნაყარი წონა მეტად მცირეა და ღუმელში ჩატვირთული ჯართის რაოდენობა ღუმელის ტევადობაზე ნაკლებია. ამიტომ ამ შემთხვევაში ხდება ჯართის დამატება. ჯართის დამატება, როგორც ცნობილია, იწვევს ღუმელის გამოსრთვას, გაჯოვებას, დნობის გახანგრძლივებას და წარმადობის შემცირებას. აქედან გამომდინარე, უმჯობესია ისე შეირჩეს ჯართი, რომ არც ქვედი დაზიანდეს და არც დნობა გახანგრძლივდეს. ამისათვის კაშმის შედგენილობას შემდეგნაირი პროპორციით ადგენენ: 30—45 % მძიმე ნატრები, 40—45 % საშუალო და 15—20 % მსუბუქი. ასეთი პროპორცია საშუალებას იძლევა კალათაში მოთავსდეს ჯართის ისეთი რაოდენობა, რომელიც ეთანადება ღუმელის ოპტიმალურ ტევადობას. დნობის ნორმალური მსვლელობისათვის მარტო ჯართის ნატროვნების პროპორციის დაცვა საკმარისი არ არის. მძიმე ნატრები ისე უნდა მოთავსდეს კალათაში და შესაბამისად — ღუმელშიც, რომ ისინი მოექცნენ ღუმელის ეპიცენტრში რკალთან ახლოს. რათა დაჩქარდეს დნობის პროცესი, წინააღმდეგ შემთხვევაში შესაძლებელია მძიმეწონიანი ნატრები ღუმელის უფრდობებზე მოხედეს, მსუბუქ ჯართში კი ელექტროდები ორმოებს სწრაფად ჩაადნობს, რკალს შეკრავს ქვედთან და გარდა დნობის გახანგრძლივებისა ავარიული სიტუაციაც შეიქმნება ქვედთან ელექტროდების შეხებისას. აი ასე მნიშვნელოვანია ჯართის შერჩევა და მისი გადაწილება დნობის სწორი წარმართვისათვის.

დამნახშირბადიანებლებად შეიძლება გამოვიყენოთ თუჯი, ელექტროდების ნამტვრევები, კოქსი, ხის ნახშირი, ჰვარტლი.

იმის გამო, რომ თუჯი გოგირდსა და ფოსფორს დიდი რაოდენობით შეიცავს, მისი რაოდენობა კაზმში არ აღემატება 20 %-ს. მასაც ხმარობენ მხოლოდ დაჟანგვის პერიოდში (ფოსფორის მოსაშორებლად) დნობის ნატარებისას, თუ კაზმში იხმარება თუჯი. მაშინ ის უნდა ჩაიტვირთოს ყველაზე ბოლოს, მსუბუქი ჯართის მეორე ნაწილთან ერთად, როგორც ყველაზე ადვილდნობადი მასალა. კოქსის ან ელექტროდების ნატეხების გამოყენებისას ისინი უნდა ჩაიტვირთონ ქველზე წვრილ და მძიმე ჯართს შორის, რომ დაეიცვათ დაწვისაგან და გაიხსნას ახლად წარმოქმნილ თხევად ლითონში. გოგირდის დაბალი შემცველობის გამო, ხის ნახშირი და ჰეარტლი გამოიყენება ლითონის დახანახშირბადიანებლად უმთავრესად აღდგენითი პერიოდის დაწყებისას ან თვით აღდგენით პერიოდში.

წილის წარმოქმნელების ნატეხითა ხორციელდება ღუმელის ქველზე მისი მდგომარეობის გათვალისწინებით. საერთოდ, რკინის მადანს და გამომწვარ კირს იღებენ კაზმის 11.5 % და 23 %-ს შესაბამისად.

მაღევირებელი შენადნობების ნატეხითაც კაზმში, უნდა იქნეს გათვალისწინებული მათი დნობის ტემპერატურა. ფერო-ვოლფრამი და ფერო-მolibდენი სასურველია ჩაიტვირთოს ელექტროდებთან ახლოს და არა ელექტროდების ქვეშ, რომ თავიდან ავიცილოთ დანაკარგები რკალის მაღალ ტემპერატურულ არეში. ისეთი ძვირფასი მაღევირებლები, როგორცაა ნიკელი, მისი შედარებით დაბალი დნობის ტემპერატურის გამო, სასურველია მოხდეს რკალისაგან მოშორებით.

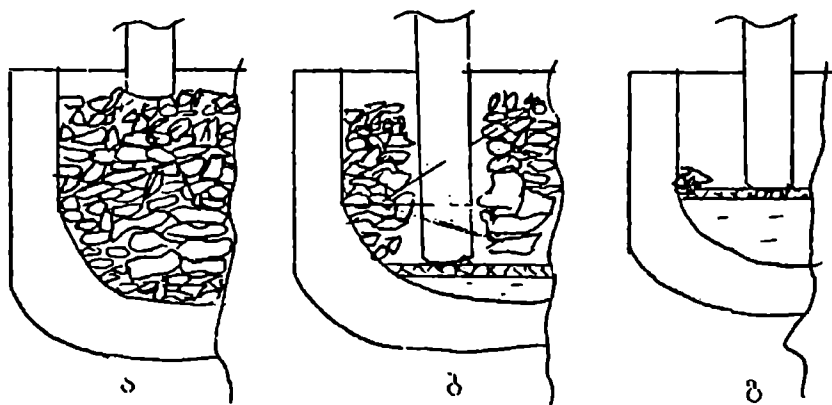
თ ა ვ ი VI

კაზმის ბაღნობა

დნობის ამ პერიოდის დანიშნულებაა რაც შეიძლება სწრაფად გადნეს კაზმი. კაზმის დნობის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე, გამოსადნობი ფოლადის შედგენილობაზე, გასადნობი კაზმის ზომებსა და განსაკუთრებით, ტრანსფორმატორის სიმძლავრეზე. იმის გამო, რომ ჩვეულებრივი, საშუალო სიმძლავრის ღუმელებში კაზმის გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობა შეადგენს მთელი დნობის ხანგრძლივობის 1/3-2/3-ს. ამიტომაც არსებობს მისი შემცირების დიდი შესაძლებლობები ზემდლავრ

ელექტროდუმელებში (100 ტ. 90 მგვ.ა), რომელიც ყველა თანამედროვე ტექნოლოგიური საშუალებითაა აღჭურვილი (ჯანგბადით, ღუმელსგარე ლითონის დამუშავების აგრეგატით და სხვ.). დნობის საერთო ხანგრძლივობა ერთი საათის ფარგლებშია და თავისი წარმადობით აღემატება იდენტური მოცულობის კონვერტერის წარმადობას. ელექტროდნობის პერიოდების შესწავლისა და აღჭურვისათვის საჭიროა სწორედ დნობის კლასიკურ მეთოდზე გამახვილდეს ყურადღება, თუ ამის საშუალებას იძლევა დნობის ტექნოლოგია. საერთოდ კი დნობის ტექნოლოგიით მიზანშეწონილად ითვლება ყველა ტევადობის ღუმელისათვის დნობის ხანგრძლივობა არ აღემატებოდეს 1-1,5 საათს.

ღუმელის ჩატვირთის შემდეგ იკვრება რკალი ელექტროდებსა და კაზმს შორის. რკალი სწრაფად ჩაადნობს კაზმში გუბეებს, რომლებიც 30-40 %-ით უფრო განიერია, ვიდრე ელექტროდის დიამეტრი და დაახლოებით 30-40 წუთის შემდეგ აღწევს ყველაზე დაბალ წერტილს. აქ იგი შეერულია უკვე გამდნარ ლითონსა და ელექტროდს შორის (სურ. 6.1).



სურ. 6.1. კაზმის დნობა

ა - გადნობის დასაწყისი; ბ - ჭების ჩადნობა; გ - გადნობის დასასრული.

გუბეების დნობისას შესაძლებელია გამოვიყენოთ ტრანსფორმატორის მაღალი სიმძლავრე, რადგან ამ შემთხვევაში რკალის მიერ გამოყოფილი სითბო მთლიანად გადაეცემა ელექტროდის ირგვლივ მყოფ გაუმდნარ კაზმს. კაზმის ჩადნობის შემდეგ კი რკალის მიერ გამოყოფილი სითბო ლითონის გარდა გადაეცემა ღუმელის კედლებს, თაღს და იწვევს მის გადახურებას - დაზიანებას. ამის თავიდან აცილებისთვის ტრანსფორმატორს გადარ-

თავენ უფრო დაბალ საფეხურზე ე.ი. ამცირებენ რკალის სიგრძეს და სათანადოდ – ტრანსფორმატორის სიმძლავრეს. აქედან გამომდინარე, გუბების ჩადნობისას წარმოიქმნება ტრანსფორმატორის უმაღლეს საფეხურზე მუშაობის შესაძლებლობა. საშუალება გვაქვს ტრანსფორმატორი ვამუშაოთ (ლაპარაკია ტრანსფორმატორის მეორად ძაბვაზე) უმაღლეს საფეხურზე. ამ შემთხვევაში მიიღება გრძელი რკალი (მაღალი ძაბვის გამო) და ელექტროწრედში მცირდება დანაკარგები (მცირე დენის ძალის გამო). ამიტომ გადნობისას მიიღება ყველაზე მაღალი ელექტრული მ.ქ.კ. დნობის პერიოდის შემცირების მიზნით ზოგიერთი ღუმელი აღჭურვილია საბრუნე მექანიზმით. ამ შემთხვევაში პირველი სამი გუბის ჩადნობის შემდეგ გამოერთავენ ღუმელს, ასწივენ ელექტროდებს, შემოაბრუნებენ ღუმელს ევრტიკალური ღერძის გარშემო, ისევ დაუშვებენ ელექტროდებს და ჩართავენ ძაბვას. ყოველ შემობრუნებაზე დამატებით სამი გუბის ჩადნობა შეიძლება. მართალია, ამ დროს დნობის ხანგრძლივობა მცირდება, მაგრამ მსოფს ხოვს მძლავრი მექანიზმების მონტაჟს ღუმელის მოსაბრუნებლად. ამიტომ კაზმის გადნობის ასეთმა გზამ ჯერჯერობით ვერ პოვა ფართო გამოყენება.

დნობის დაჩქარებისათვის გამოიყენება აგრეთვე აირ-ჟანგბადის სანთურები. მათი საშუალებით გადნობის ხანგრძლივობა მცირდება 15–20 %-ით, თუმცა სათბობის საერთო ხარჯი მატულობს. ეკონომია მიიღება იმის ხარჯზე, რომ აირი ელექტროენერგიაზე უფრო იაფია.

გარდა ამისა, გადნობის დაჩქარებისათვის გამოიყენება აიროვანი ჟანგბადი. როგორც კი გაჩნდება ღუმელის ქვედზე საკმარაოდენობის თხევადი ლითონი, მაშინვე იწყებენ აიროვანი ჟანგბადის შებერვას. რკინის და მასში გახსნილი ელემენტების: ალუმინის, კაუბადის, ქრომის, მანგიუმის, ნახშირბადის და სხვათა დაჟანგვის ეგზოთერმიული რეაქციების შედეგად გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე გამდნარი ლითონი გადახურდება და გაადნობს გაუმდნარ კაზმს. მართალია, ამ შემთხვევაში დნობის ხანგრძლივობა მცირდება, მაგრამ იზრდება რკინისა და დაჟანგული ელემენტების დანაკარგები. სწრაფი გადნობის ეს ხერხი მიზანშეწონილია იმ შემთხვევაში, როცა რკინის და დაჟანგული ელემენტების დანაკარგების ღირებულება იფარება დნობის ხანგრძლივობის შემცირებით მიღებული ეკონომიით.

კაზმის გადნობისას იჟანგება კაუბადი, ფოსფორი, მანგანუმი და სხვა. დნობის დაჩქარების ერთ-ერთ ხერხს წარმოადგენს აგრეთვე ფოსფორის მოშორების შეთავსება გადნობის პერიოდთან.

იმისათვის, რომ მოხდეს განფოსფორება, საჭიროა გადნობის პერიოდშივე შეიქმნას საჭირო შედგენილობის და ფუქიანობის წიდა ანუ წიდა უნდა შეიცავდეს არანაკლებ 15 % რკინის ქვეჟანგს. მისი ფუქიანობა (CaO/SiO_2) არ უნდა იყოს 1,8-ზე ნაკლები. ამისათვის, კაშში აძლევენ მისი წონის 6 %-მდე რკინის მადანს და 2 %-მდე ახლადგამომწვარ კირს. გარდა ამისა, შუა გადნობისას, საჭიროების შემთხვევაში აბაზანაში კიდევ უმატებენ რკინის მადანს ~1 % და გამომწვარ კირს. წიდის მალაღმა ფუქიანობამ და მასში გახსნილმა რკინის ქვეჟანგმა უნდა უზრუნველყოს გადნობის შემდეგ ლითონში არა უმეტეს 0,02 % P-ის მიღება. გადნობის დროს იჟანგება აგრეთვე 0,2–0,25 % C. მისი დაჟანგვა იწვევს აბაზანის დუღილს, რაც ხელს უწყობს ლითონის ტემპერატურის აწევას და გათანაბრებას; შესაბამისად – ლითონის განგოგირდებასაც.

კაშმის მთლიანი გადნობის შემდეგ აიღება სინჯი მისი ქიმიური ანალიზისათვის და იხდება წიდის 3/4. რითაც მორდება ფოსფორის საგრძნობი ნაწილი. თუ აღებულ პირველ სინჯში ნახშირბადი დაბალი აღმოჩნდება, მაშინ მთლიანად უნდა მოიხადოს წიდა და მოხდეს გამდნარი ლითონის დანახშირბადიანება.

თ ა ვ ი VII

დაჟანგვის პერიოდი

დნობის ამ პერიოდის დანიშნულებაა: 1. ფოლადში დასაშვებ ზღვარზე დაბლა ფოსფორის შემცველობის შემცირება; 2. ფოლადში აზოტის, წყალბადისა და არალითონური მინარევების შემცველობის შემცირება; 3. აბაზანის ჟანგვითი უნარის ოპტიმალურ მდგომარეობამდე მიყვანა, რათა გაადვილდეს განჟანგვის რეაქციების მიმდინარეობა აღდგენით პერიოდში; 4. ლითონის აბაზანის გადახურება 120–130 °C-ით მზა ფოლადის დნობის ტემპერატურასთან შედარებით. თუ დნობა მიმდინარეობს აღდგენითი პროცესის გარეშე, მაშინ დაჟანგვის პერიოდში უნდა განხორციელდეს ნაწილობრივი განგოგირდებაც.

დაჟანგვის პერიოდში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ტემპერატურულ რეჟიმს. გამდნარი აბაზანის ინტენსიური დუღილი მხოლოდ კარგად გახურებული თხევადი ლითონისათვისაა დამახასიათებელი. დუღილის ერთ-ერთი ძირითადი მიზანია ლითონში

გახსნილი წყალბადის, აზოტისა და სხვა არალითონური მიწარე-
ვების შემცველობის შესაძლებელ მინიმუმამდე შემცირება და
თხევადი აბაზანის კომოგენიზაცია. ამგვარად, დაჟანგვის პერიოდში
ლითონის ტემპერატურა მატულობს ნახშირბადის შემცველობის
შემცირებასთან ერთად. ფოლადში გახსნილი ნახშირბადის წვის
შედეგად წარმოიქმნება ნახშირჟანგი, რომელიც არ იხსნება ლი-
თონში, გამოიყოფა ბუშტების სახით და იწვევს მის დუღილს.
რაც უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს ნახშირბადის დაჟანგვა
დადგენილ ნორმებში, მით მეტად ძლიერდება აბაზანის დუღილი
და ჩქარდება ოპტიმალურ ტემპერატურამდე ლითონის გახურება
(დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისათვის 1630–1640 °C, მაღალ-
ნახშირბადიანებისათვის 1580–1600 °C) თხვეადდენადი წიდის წარ-
მოქმნა ლითონის სათანადო გახურების დამადასტურებელია, რის
შემდეგაც ლუმელში მადანსა და გამომწვარ კირს შეიტანენ. ამი-
სათვის ლუმელს გადმოხრიან 4–6 °-ით სამუშაო ფანჯრის მხარეს.
მადანს და გამომწვარ კირს მცირე ულუფებით ამატებენ. პრაქტი-
კით დადგენილია, რომ 0,01 % ნახშირბადის ამოსაწვავად საჭიროა
0,6–1,0 კგ მადანი 1 ტონა ლითონზე, რაც უფრო მაღალია ნახშირ-
ბადის შემცველობა და თხევადი ლითონის ტემპერატურა. მით
მეტი მადანი და კირია პროცესისათვის საჭირო, ნახშირბადის
დაჟანგვის შედეგად გამოყოფილი ნახშირჟანგი იწვევს წიდის
აქაფებას, მისი დონე მაღლა იწვევს და იგი თავისთავად გადმო-
ედინება ფანჯრის ზღურბლიდან. ეს აუცილებელია ფოსფორის
მოსაშორებლად, რადგან თხევადი ლითონის ტემპერატურის
მომატებისას შეიძლება მოხდეს წიდიდან ფოსფორის აღდგენა
და მისი ისევ ფოლადში გადასვლა. თვითდინებით გადმოსულ
წიდას თან მოსდევს დაჟანგული ფოსფორი და მისი შემცველობა
დარჩენილ წიდაში მცირდება, რაც აძინელებს ფოსფორის გადა-
სვლას თხვეად ლითონში.

რკინის მადნის და გამომწვარი კირის ახალ-ახალ ულუფებს
აძლევენ მაშინ, როცა დუღილის ინტენსიურობა კლებულობს.
დაჟანგვის პერიოდის მსვლელობისას იღებენ სინჯებს ქიმიურ
ანალიზზე. ამოწმებენ ნახშირბადის, მანგანუმისა და ფოსფორის
შემცველობას ფოლადში. ამ ანალიზებით თვალყურს ადევნებენ
ჟანგვითი პროცესის მიმდინარეობას თხევადი ფოლადის აბაზანაში.

დაუშვებელია რკინის მადნის ჩაყრა ცივ ლითონში, რადგან
ჯერ ერთი, მადანი კიდევ უფრო გააცივებს ლითონს და შეაჩერებს
დუღილს (ნახშირბადის დაჟანგვის რეაქცია დაბალ ტემპერა-
ტურებზე არ მიდის). ლითონის თანდათან გახურების შემდეგ კი,
მთელი მადანი ერთბაშად შედის რეაქციაში, იწყება ნახშირბადის

ერთდროული სწრაფი დაჟანგვა, რასაც შეიძლება მოაყვეს წიდისა და ლითონის დონის აწევა და მათი გადმოღვრა სამუშაო ბაქანზე. ასეთ შემთხვევაში შეიძლება გადმოიღვაროს გამდნარი ლითონის დიდი რაოდენობა და შეიქმნას ავარიული სიტუაცია.

საპასუხისმგებლო ფოლადების გამოღობისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ნახშირბადის ამოწვის სინქარეს. მიზანშეწონილია ამოწვას ფოლადის დანიშნულების მიხედვით 0,3–0,5 %C. ამოწვის საშუალო სინქარეც უნდა იყოს 0,3–0,5 %C/სთ. ნახშირბადის ამოწვის ასეთი სინქარე ყველაზე უკეთ უზრუნველყოფს თხევადი ლითონიდან აირებისა და სხვა ჟანგულების მოშორებას. პრაქტიკულად ლითონის დუღილის დასაწყისში ნახშირბადის ამოწვის სინქარეა 0,6 %C/სთ. თხევად ლითონში ნახშირბადის შემცველობასთან ერთად, მცირდება მისი ამოწვის სინქარეც და დუღილის ბოლოს აღწევს 0,3 %C/სთ.

დაჟანგვის პერიოდის კარგად ჩატარებით სწორ ტემპერატურულ რეჟიმში, წიდის მუდმივი განახლებით, მისი ფუძიანობის გაზრდით 2,7–3-მდე მასში რკინის ქვეჟანგის მაღალი (15–20 %) შემცველობით, შესაძლებელია თხევად ლითონში ფოსფორის შემცველობის 0,005–0,012 %-მდე დაყვანა.

ჟანგვითი პროცესის დაჩქარება შესაძლებელია აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებითაც. მას შემდეგ, რაც ფოსფორის შემცველობა თხევად ლითონში დაიყვანება სასურველ რაოდენობამდე და მოხდინან წიდის უდიდეს ნაწილს, ნახშირბადის დაჟანგვას იწყებენ აიროვანი ჟანგბადით. აიროვანი ჟანგბადით ნახშირბადის ამოწვის სინქარე ძალიან დიდია. მაგალითად, 40-ტონიანი ტევადობის ღუმელში ჟანგბადის 1200 მ³/სთ ხარჯისას ნახშირბადის ამოწვის სინქარე აღწევს 3–4 %C/სთ, როცა ლითონში 0,9–1,0 % ნახშირბადია – 1,5–2,0 %C/სთ, როცა ლითონში 0,05 % ნახშირბადია – 0,01–0,03 %C/სთ. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ნახშირბადის ამოწვის სინქარე დამოკიდებულია აიროვანი ჟანგბადის ხარჯზე.

ჟანგბადის თხევად ლითონში შებერვისას მისი ტემპერატურა სწრაფად მატულობს. პრაქტიკულად თვლიან, რომ ერთი წუთის განმავლობაში შებერვით ლითონის ტემპერატურა მატულობს 8–10 °C-ით ან 1,8–2,0 °C-ით 0,01 % ნახშირბადის ამოწვისას. აქედან გამომდინარე, ნახშირბადის ამოწვის დაჩქარების დრო თხევად ლითონის ტემპერატურის აწევის თვალსაზრისით, შეიძლება შემცირდეს 12–15 წუთამდე, რაც საკმარისია 0,5–0,6 % ნახშირბადის ამოწვისათვის.

ნახშირბადის დაჟანგვის სინქარის მომატებით შესაძლებელია მთელი დაჟანგვის პერიოდის შემცირება. ჟანგბადის 4–7 მ³/ტ ხარჯისას 5–10 %-ით იზრდება ღუმელის წარმადობა და 5–12 %-ით

მცირდება მოხმარებული ელექტროენერჯის რაოდენობა (ჟანგბადის შებერვის დაწყებიდან რამდენიმე წუთის შემდეგ ღუმელი უნდა გამოირთოს ქსელიდან, რომ არ მოხდეს თხევადი ლითონის ზედმეტად გადახურება).

ჟანგბადის შებერვისას ისევე, როგორც რკინის მადნის გამოყენებისას, იღებენ სინჯებს ლითონის ქიმიური ანალიზის ჩასატარებლად. შებერვის დამთავრებისას ნახშირბადის შემცველობა ლითონში, მზა ფოლადთან შედარებით, უნდა იყოს (ისევე, როგორც რკინის მადნის გამოყენებისას) უფრო დაბალი, რომ აღდგენით პერიოდში შეექლოთ იაფი, ნახშირბადიანი ფეროშენადნობების გამოყენება. გარდა ამისა, აიროვანი ჟანგბადის შებერვისას ცდილობენ, რომ ნახშირბადის შემცველობა თხევად ლითონში არ დაეარდეს 0,1 %-ზე ქვევით, რათა ლითონი არ გადაიჟანგოს. რასაკვირველია, ეს მოქმედება გამართლებულია მხოლოდ მაშინ, როცა მზა ლითონში ნახშირბადის შემცველობა 0,1–0,15 %-ს უნდა აღემატებოდეს. თუ მზა ფოლადში ნახშირბადის შემცველობა 0,1 %-ზე ნაკლებია, მაშინ ნახშირბადს ამოწვავენ უფრო დაბალ შემცველობაში და შემდეგ აწარმოებენ სპეციალურ განჯანგავას.

დნობის პერიოდში იჟანგება კაზმში ჩაყოფი ქრომიც და ეს პროცესი მაქსიმუმს აღწევს კაზმის გადნობისას. წილის თვითდინებით ან ხელოვნური მოხდისას ქრომის ჟანგეულებიც მისდევს მას და ქრომიც იკარგება. ამიტომ დაჟანგვის პერიოდით მიმდინარე დნობისას სასურველია კაზმში არ მოხედეს ქრომის შემცველი ჯართი. თუმცა ხშირად, ფოლადში ნიკელისა და მოლიბდენის შესაყვანად კაზმში ხმარობენ ქრომნიკელიან და ქრომონიკელ-მოლიბდენიან ჯართს (ჟანგვის პერიოდში, ქრომისაგან განსხვავებით, ნიკელი და მოლიბდენი არ იჟანგება). ამ შემთხვევაში ცდილობენ ისე გაიანგარიშონ კაზმი, რომ მისი გადნობისას ქრომის შემცველობა არ აღემატებოდეს 0,4 %-ს. ამავე დროს, ქრომის ძნელდნობადი ჟანგეულები მეტისმეტად ასქელებს წიდას, რაც ართულებს პროცესის მსვლელობას და განსაკუთრებით აძნელებს განფოსფორებას. ამიტომ კაზმში ქრომის 0,4 %-ზე მეტი შემცველობა დნობის ჟანგვითი პროცესის ჩატარებისას, მიზანშეუწონელია.

ამრიგად, დაჟანგვის პერიოდის ჩატარება აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებით ამცირებს დნობის ხანგრძლივობას, ზრდის ღუმელის წარმადობას. ამავე დროს ამ პროცესს მართვია სჭირდება, რომ არ მოხდეს ლითონის ზედმეტი გადახურებაც, რაც იწვევს ღუმელის ამონაგის დაზიანებასა და წყალბადის შემცველობის გაზრდას თხევად ფოლადში (ტემპერატურის აწევით იზრდება

წყალბადის და ყველა აირის ხსნადობა მასში). ლითონის გადახურების გამორიცხვის საშუალებას იძლევა თანამედროვე ხელსაწყო-დანადგარები და პროცესის მართვის ავტომატური სისტემები.

ამრიგად, განფოსფორებით, ლითონის დუღილისა და მისი ტემპერატურის აწევით მთავრდება დაჟანგვის პერიოდი. მადნის ბოლო ულუფის ან აიროვანი ჟანგბადის მიწოდების შეწყვეტის შემდეგ თხევად ლითონს ღუმელში აყოვნებენ არა ნაკლებ 10 წუთისა, რომ დამყარდეს წონასწორული პირობები თხევად ლითონში გახსნილ ჟანგბადსა და ნახშირბადს შორის და გაწონასწორდეს მათი ურთიერთქმედება. ასევე მყარდება წონასწორობა წიდაში გახსნილ რკინის ქვეჟანგსა და თხევად ლითონში გახსნილ ჟანგბადს შორის. ამ პროცესებს ხელს უწყობს ღუმელში წიდას თხელი ფენა, რომელშიც თავისუფლად გადადის ჟანგეულები და ლითონში გახსნილი აირები. ასეთი ლითონის განჟანგვა კი აღდგენით პერიოდში ხირთულეს არ წარმოადგენს და ყოვლადიც ხარისხიანი გამოდის.

დაბალი სიმძლავრის ელექტროდქმედებში დაჟანგვის პერიოდის ხანგრძლივობა 40–70 წუთია, აიროვანი ჟანგბადის გამოსყუვნებისას – 35 წუთი. მის ხანგრძლივობას ძირითადად განაპირობებს ფოსფორის დაჟანგვის სიჩქარე. სოგერით ქარხანაში ამ პროცესის დასაჩქარებლად ჟანგბადთან ერთად შეაფრქვევენ გამომწვარი კირის და მლღობი შპატის ფხენილს. ეს ფხენილები გაქრევის არეში ამცირებს თხევადი ლითონის ტემპერატურას (CaO იერთებს ფოსფორის ჟანგეულებს) და ამით ხელს უწყობს განფოსფორების პროცესს.

დაჟანგვის პერიოდში, აიროვანი ჟანგბადის შებერვისას ინტენსიურად მიმდინარეობს განგოგირდების პროცესი და ლითონის სცილდება გოგირდის 40–60 %. განგოგირდებას ხელს უწყობს წიდას მაღალი ფუძიანობა და მაღალი ტემპერატურა დაჟანგვის პერიოდის ბოლოს. თუმცა რკინის ქვეჟანგი FeO , რომელიც კარგად იხსნება ლითონშიც და წიდაშიც, განგოგირდების ძლიერი ხელისშემშლელია. განგოგირდება ძირითადად ხდება აღდგენით პერიოდში.

ბანქანბვპ. ალღენითი პერიოდი

ალღენითი პერიოდის დანიშნულებაა: 1. ლითონის განჟანგვა; 2. განგოგირდება; 3. ფოლადის დაყვანა საჭირო ქიმიურ შედგენილობამდე; 4. აბაზანის ტემპერატურის რეგულირება; 5. კარგად განჟანგული, მაღალფუძიანი, თხევადენადი წიდის მიღება და ლითონთან ერთად მისი გამოშვება სანამოსხმო ციციხეში.

განჟანგვას აწარმოებენ ორი ხერხით: 1. პირდაპირი განჟანგვის ხერხით – განმჟანგველების მიწოდებით უშეალოდ თხევად ლითონში; 2. დიფუზიური განჟანგვის ხერხით – განმჟანგველების მიწოდებით წიდაში მისი განჟანგვის მიხნით.

ყუროშენადნობების ლითონში მიწოდებისას რეაქციები მიმდინარეობს აბაზანის სხედასხვა სიღრმეზე. რაც დამოკიდებულია განმჟანგველების წონასა და ზომებზე. განმჟანგველი ელემენტები (C, Si, Mn, Al და სხვა) უერთდება ლითონში გახსნილ ჟანგბადს. მიღებული ახალი ნაერთი-ჟანგველი ფოლადზე ნაკლები სიმკვრივის (კუთრი წონის) გამო ამოტივტივდება წიდაში. ამგვარად ხდება ფოლადში გახსნილი ჟანგბადის მოცილება. როგორც წესი, ჟანგბადი ერთადერთი აირია, რომელიც არც მყარ და არც თხევად ლითონში თავისუფალი სახით არ გეხედება. განჟანგვის შედეგად მიღებული ჟანგველების ლითონიდან წიდაში გადასვლის სიჩქარე დამოკიდებულია მათ ფორმაზე, სიდიდესა და შედგენილობაზე. ამიტომ დამატებითი ღონისძიებების გატარების გარეშე ლითონში შესაძლებელია დარჩეს გარკვეული რაოდენობა განჟანგვის პროდუქტების, რაც გააუარესებს ლითონის ხარისხს.

ლითონის მეორე, ე.წ. დიფუზიური ხერხით განჟანგვა წარმოებს წიდიდან. ამ შემთხვევაში განჟანგვა დამოკიდებულია წიდასა და ლითონს შორის ჟანგბადის განაწილების კონიხე-კოეფიციენტზე). წიდა და თხევადი ფოლადი ურთიერთგანსხვავებული კუთრი წონის გამო როგორც ლემელში. ასევე ციციხეში გარკვეულ ებებულია. რკინის ჟანგი (FeO) ორივეში კარგად იხსნება. ამიტომ წიდაში გახსნილ რკინის ქვეჟანგსა და ლითონში გახსნილ ჟანგბადს შორის მყარდება წონასწორობა. ის ძირითადად დამოკიდებულია ლითონის ქიმიურ შედგენილობასა და წიდის ყუძიანობაზე მოცემული ტემპერატურისათვის. წიდის განჟანგვის დროს, მცირდება მასში რკინის ქვეჟანგის შემცველობა, რაც ბუნებრივია, იწვევს ალნიშნული წონასწორობის დარღვევას და თხევადი ლითონიდან ჟანგბადის გადასვლას წიდაში ჟანგველების სახით.

განჯანგვის რეაქციები ამ შემთხვევაში მიმდინარეობს წილისა და თხევად ლითონის შემსებ ზედაპირზე. ამიტომ ამ მეთოდის დიდი უნირატესობაა, რომ განჯანგვის შედეგად წარმოქმნილი ნაერთები ლითონში არ რჩება.

ელექტრორკალურ ღუმელებში შესაძლებელია წილაში რკინის ქვეანგის შემცველობის შემცირება 0,05 %-ზე ქვევით. წილაში რკინის ქვეანგის ამ შემცველობას შეესაბამება თხევად ლითონში არა უმეტეს 0,005 % ჯანგბადისა. ეს ითვლება ამ ხერხის დადებით მხარედ. უარყოფითად უნდა ჩაითვალოს ის გარემოება, რომ კარგად განჯანგული წილის ქვეშ თხევადი ლითონი დიდხანს უნდა იმყოფებოდეს, რადგან განჯანგვის რეაქციების მსვლელობისათვის საჭიროა ჯანგბადის დიფუზიური გადაადგილება თხევადი ლითონის სიღრმიდან მის ზედაპირამდე. ამ დროს კი ხდება თხევადი ლითონის მიერ აირების (განსაკუთრებით წყალბადის) შთანთქმა და ღუმელის ამონაგიდან ჯანგეულების გადასვლა თხევად ლითონში. ერთიც და მეორეც, გარდა ღნობის გახანგრძლივებისა აუარესებს მზა ფოლადის ხარისხს.

საერთოდ, ელექტრორკალურ ღუმელებში განჯანგვის მეტად ხელსაყრელი პირობებია (ეს ეხება განსაკუთრებით პაჭარა და საშუალო ტევადობის ღუმელებს). ღუმელებში შესაძლებელია შეიქმნას ძლიერ აღმდგენელი ატმოსფერო ნახშირჟანგის ჭარბი (70 % CO) წნევით, რაც აბრკოლებს ატმოსფერული ჰაერისა და მასში მყოფი ჯანგბადის შეწოვას ღუმელის სამუშაო არეში.

აღდგენითი პერიოდის დაწყების წინ ლითონში ნახშირბადის შემცველობა არ უნდა აღემატებოდეს გამოსადნობი მზა ფოლადის სტანდარტებით გათვალისწინებულ ქვედა ზღვარს. ეს დამოკიდებულია ფოლადის ბოლო სინჯის ქიმიურ შედგენილობასა და ლითონში დასამატებელ ფეროშენადნობებში ნახშირბადის კონცენტრაციაზე. თუ დაჯანგვის პერიოდის შემდეგ ნახშირბადი ამოიწვა ისეთი დიდი რაოდენობით, რომ ფეროშენადნობებში არსებული ნახშირბადი საკმარისი არ იქნება გამოსადნობ (მზა) ფოლადში ნახშირბადის სასურველი შემცველობის მისაღებად. მაშინ საჭიროა თხევადი ლითონის დანახშირბადიანება. ამისათვის სასურველია მთლიანად მოიხადოს დაჯანგვის პერიოდის წილა და ლითონის ზედაპირი დაეფაროს კოქსის ანაცრით. ელექტროდთა ნამტვრევების ფხენილით ან თუ ამის საშუალება არსებობს, უმჯობესია ხის ნახშირის ფხენილით. ლითონის მიერ ნახშირბადის ათვისების კოეფიციენტი კოქსისათვისაა 0,6–0,7, ხოლო ელექტროდების ნამტვრევებისათვის – 0,97–0,98. საერთოდ, აბაზანის დანახშირბადიანება აღდგენითი პერიოდის დაწყების შემდეგ არასასურ-

ველი იძულებითი პროცესია. გარდა ამისა, დნობის პროცესის განხორციელება და წიდის მოხდასთან დაკავშირებული ტემპერატურის დაცემა ხელს უწყობს აირების შთანთქმას, რომელთა გამოყოფაც თხევადი ლითონიდან აღდგენით პერიოდში საკმაოდ ძნელია.

აღდგენითი პერიოდი იწყება აღმდგენელი წიდის შექმნით. ის შეიცავს ახლად გამომწვარ კირს, მლღობ შპატსა და შამოტის აგურის ნაბეჭერეებს შემდეგი შეფარდებით 5:1:1 (ეს შეფარდება სხვადასხვა ქარხნებისათვის შეიძლება სხვადასხვა იყოს. მაგრამ განსხვავება დიდი არ არის). წიდის ოპტიმალური რაოდენობაა ლითონის წონის 2-4 %. წიდის სწრაფი გადნობისათვის ტრანსფორმატორი საშუალო სიმძლავრეზე უნდა იყოს ჩართული 10-15 წუთის განმავლობაში, შემდეგ კი გადაართოს დაბალ საფეხურზე. თუ დნობის დროს ფეროშენადნობთა დიდი რაოდენობაა შესატანი (ლითონის წონის დაახლოებით 10 % და მეტი), მაშინ ტრანსფორმატორის სიმძლავრე რასაკვირველია უნდა გაიზარდოს.

ხარისხოვანი ფოლადების გამოდნობისას განუანგვის ამ ორი ხერხიდან, თავდაპირველად უპირატესობა ენიჭებოდა დიფუზიურს. განმუანგველები (კოქსი, ფეროსიცილიუმი, ალუმინი და სხვ.) წიდას მიეწოდება ფხვნილის სახით. ისინი აღადგენენ წიდაში მყოფ რკინის ქვეანგს, მანგანუმის ქვეანგსა და ქრომის ჟანგეულებს. ბუნებრივია, მათი წილის შემცირება წიდაში იწვევს თხევადი ლითონიდან წიდაში ჟანგბადის გადასვლას. დიფუზიური განუანგვა შეიძლება წარმართოს თეთრი და სუსტი კარბიდული წიდებით. თეთრი წიდის მისაღებად აღდგენითი პერიოდის დასაწყისში წიდას ამუშავებენ კოქსით და შემდეგ კოქსისა და 75 %-იანი ფეროსიცილიუმის ფხვნილით. დნობის განმავლობაში რამდენჯერმე უნდა განხორციელდეს წიდის დამუშავება. იმაგდროულად დამუშავების პროცესში კოქსის რაოდენობა თანდათან მცირდება. დაახლოებით 20-40 წუთის შემდეგ წიდა თეთრდება. ასეთი წიდა ასევე გაცივებით იშლება თეთრი ფხვნილის სახით. კოქსის ხარჯი განუანგვის ამ ხერხის გამოყენებისას შეადგენს 1-2 კგ-ს 1 ტონა ფოლადზე.

კოქსის ხარჯის გაზრდა 2-3 კგ-მდე ერთ ტონა ლითონზე საკმარისია არა მარტო ლითონთა ჟანგეულების აღსადგენად და ატმოსფეროდან შეწოვილი ჟანგბადისათვის, არამედ წიდაში მყოფი CaO -ს გარკვეული ნაწილის აღსადგენადაც. $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CO} + \text{Ca}_2$. კალციუმის კარბიდის წარმოქმნას ხელს უწყობს მაღალი ტემპერატურა. პერმეტული ღუმელის შემთხვევაში წიდაში წარმოიქმნება 2 %-მდე Ca_2 , ასეთი წიდა ჰაერზე იშლება მუქი ფერის ფხვნილად, თუ წიდის განუანგვისათვის საჭირო ნახშირბადის

რაოდენობა შემცირდება. მაშინ წარმოიქმნება სუსტი კარბიდული წიდა. კარბიდული წიდებით დნობის ნატარებისას ლითონი საგრძნობლად ნახშირბადიანდება (0.1 % და მეტი). კარბიდი კარგად ასველებს ფოლადს. ამის გამო, ლუმელიდან ციციხეში გამოშვებისას ლითონის ჭაველი თან იტაცებს კარბიდული წიდის ნაწილაკებს. ნამოსხმის პროცესში ამ ნაწილაკების გარკვეული ნაწილი რჩება თხევად ლითონში და წარმოქმნის უხეშ არალითონურ ჩანართებს. ამის თავიდან ასაცილებლად წიდას ათხევადებენ ლუმელის ღია ფანჯრიდან მლღობი შპატისა და შამოტის ნამტვერვების შეტანით. ატმოსფეროს ჟანგბადის სემოქმედებით კალციუმის კარბიდი იშლება.

როგორც უკვე იყო ნათქვამი, დიფუზიური განჟანგვისას განჟანგვის რეაქციები მიმდინარეობს წიდისა და თხევადი ლითონის გამყოფ ზედაპირზე და თვით წიდაში. ლითონი არ ჭუჭყიანდება განჟანგვის ნაერთებით მაშინ, როცა წიდიდან ლითონში განმჟანგველების გადასვლის სინქარე ნაკლებია ლითონიდან წიდისაკენ ჟანგბადის დიფუზიასზე.

ერთ-ერთ განმჟანგველს, როგორც ცნობილია, წარმოადგენს ნახშირბადი. აღდგენითი პერიოდის დასაწყისისათვის ლითონში ჟანგბადის შემცველობა განისაზღვრება ნახშირბადის შემცველობით თხევად ლითონში და იგი ყოველთვის მეტია წონასწორულზე. მაგრამ, როგორც გამოცდილებამ გვანჩვენა, თეთრი და კარბიდული წიდების ქვეშ ლითონის დაყოვნებისას თხევად ლითონში ჟანგბადის შემცველობა არ ჩამოდის იმაზე დაბლა, რაც განსაზღვრულია ნახშირბადთან წონასწორობის პირობებით. თანაც, თეთრი წიდების ქვეშ დაყოვნება ანახშირბადიანებს ლითონს 0.02–0.04 %-ით, სუსტი კარბიდულისას – 0.03–0.06 %-ით, კარბიდულისას – 0.1 % და მეტით. ეს იმაზე მეტყველებს, რომ დიფუზიური განჟანგვისას არა მარტო ჟანგბადი გადადის წიადში. არამედ წიდიდანაც გადადის თხევად ლითონში ნახშირბადი.

სხვა განმჟანგველების შემთხვევაშიც მიიღება ანალოგიური სურათი. თხევად ლითონში განმჟანგველის კონცენტრაციის ზრდის მიუხედავად ჟანგბადის რაოდენობა ლითონში არ ჩამოდის იმაზე დაბლა, რაც განსაზღვრულია ძლიერ განმჟანგველებთან წონასწორობის პირობებით. ამრიგად, დიფუზიური განჟანგვისას თხევად ლითონში ჟანგბადის შემცველობა წონასწორულზე მეტია.

ჟანგბადის რაოდენობის შემცირება თხევად ლითონში ძლიერი განმჟანგველების (ალუმინი, ტიტანი, კალციუმი და სხვა) გამოყოფისას მაშინ ხდება, როცა ეს ელემენტები გადადის თხევადი ლითონის სიღრმეში. რასაკვირველია, ამ დროს ლითონში უნდა

წარმოიქმნას განჯანგვის პროდუქტები — ჟანგოვლები, რომელთა მოცილება ბევრ ფაქტორზეა დამოკიდებული.

გარდა ამისა, დიფუზიური განჯანგვის ეფექტურობა მცირდება ღუმელის ტეფადობის გაზრდასთან ერთად (მცირდება წილისა და თხევადი ლითონის შეხების ხვედრითი ყარობა). ამიტომ განჯანგვის პროცესების დასაქარებლად, დიდი ტეფადობის ღუმელებში განსაკუთრებით მიმართავენ სიღრმულ განჯანგვას. უჭკალოდ ლითონში შეტანილი განჯანგველები რამდენიმე წუთში უფრო მეტ ჟანგბადს გამოადვენინან თხევადი ლითონიდან, ვიდრე დიფუზიური განჯანგვით 1,5–2,0 საათში. მიუხედავად ღრის დანაკარგისა, აღმდგენელი წილის ქვეშ თხევადი ლითონის დაყოვნება ხელს უწყობს სიღრმული განჯანგვის შედეგად წარმოქმნილი ნაერთების წიდაში გადაყვანას, იცავს თხევად ლითონს მასში აირების გახსნისაგან და, რაც ყველაზე უფრო ანგარიშგასაწეია, აადვილებს განგოვირებას.

ზემოთ ნამოთვლილი განჯანგვის ღონისძიებები სასურველია ერთდროულად ჩატარდეს აღდგენით პერიოდში. ამიტომ საპასუხისმგებლო ფოლადების გამოდნობის ტექნოლოგია ითვალისწინებს განჯანგვის ორივე ხერხის უპირატეს მხარეს. ასეთი ტექნოლოგიით, ჟანგითი პერიოდის წილის მოხდის შემდეგ, ლითონის ზედაპირზე აწოდებენ ლითონურ განჯანგველებს (უმთავრესად ფეროციკლიუმს, სილიკონმანგანუმს, ყეროზანგანუმს, ყეროქრომს, ალუმინს და სხვა ზოგიერთ მალევირებელ ელემენტებს). ლითონური განჯანგველები ისეთი რაოდენობით უნდა ჩაემატოს, რომ უსრუნველყოს სილიციუმის შემცველობა ლითონში ~0.15 %. მანგანუმისა ქვედა ზღვარზე, ალუმინისა — ~0.05–0.1 % (ქრომიც ქვედა ზღვარზე თუ გამოსადნობ ფოლადში მისი შემცველობა არ აღემატება ~1.5 %). შემდეგ იქმნება აღმდგენელი წიდა და მას ამუშავებენ განჯანგველების ფხვნილით. წილების ასეთი დამუშავებით რკინის ქვეჯანგის შემცველობა მათში ვარდება 0.5 %-ზე ქვევით, CaO-ს შემცველობა აღწევს 50–70 %-ს და ფუძიანობა — 2.5–3.0 %-ს. ასეთი წილები კი წარმოადგენს საუკეთესო განმაგოვირებლებს. მითუმეტეს, რომ სიღრმული განჯანგვის წყალობით, თხევად ლითონში ჟანგბადის შემცველობა სწრაფად მცირდება. გარდა ამისა, მაღალფუძიანი წილის გასათხევადებლად ხმარობენ მლლობ შპატს (CaF₂), რომელსაც დამატებით შეაქვს კალციუმი და ფტორი. ამ უკანასკნელებს შეუძლია CaS-სა და აქროლადი SF₆-ის წარმოქმნა.

ამრიგად, აღდგენით პერიოდში იქმნება საუკეთესო პირობები განგოვირებისათვის. წიდასა და თხევად ლითონს შორის გოვირდის განაწილების კოეფიციენტმა შეიძლება მიაღწიოს 50–60-ს.

რადგან განგოვირდება უმთავრესად მიმდინარეობს წიდისა და თხევადი ლითონის გამყოფი შედაპირზე, ბუნებრივია, ლითონის ხშირი არევა ხელს უწყობს ამ პროცესს. თხევად ლითონის განგოვირდებისათვის (და სხვა მიზეზებითა) ხშირად მიმართავენ თხევადი ლითონის ელექტრომაგნიტურ არევის (ლითონის ხელით არევა ძალიან მძიმე სამუშაოა და უფრო ნაკლებ ეფექტური). მიუხედავად არევისა, თხევად ლითონსა და წიდას შორის გოვირდის განაწილების წონასწორული პირობების მიღწევა შეუძლებელია. წონასწორობასთან მიახლოება ხდება ლითონის ღუმელიდან გამოშვებისას, როცა ლითონის ჭავლი კარგად აირევა განჟანგულ წიდასთან ერთად. ამ შემთხვევაში წიდისა და თხევადი ლითონის შეხების შედაპირი მკვეთრად იზრდება და განგოვირდება უფრო სრულად მიდის. განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში როდესაც გამოშვებასთან ერთად ნეიტრალური აირებისა და განგოვირდებული რვაგენტებით ხდება ციციხეში ლითონის დამუშავება.

ლითონის კარგი განჟანგვისათვის დნობის ბოლოს ფოლადში შეიტანენ ძლიერ განმჟანგველს — ალუმინს. ალუმინი იმდენი შეაქვთ, რომ ლითონში დარჩეს 0.01—0.02 %. ფოლადში ალუმინის ეს რაოდენობა საგრძობლად ამცირებს ღუმელიდან თხევადი ლითონის გამოშვებისას ჰაერის ჟანგბადთან ურთიერთქმედების ეფექტს. ფოლადის დანიშნულებისა და ქიმიური შედგენილობის მიხედვით საბოლოო განჟანგვისათვის იხმარება 0.3—2.0 კგ ალუმინი ტონა ფოლადზე. გარდა ამისა, ალუმინის გარკვეული რაოდენობა ხელს უწყობს წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას. მაგრამ, ამასთანავე მხედველობაშია მისაღები, რომ ალუმინით განჟანგვისას ჩანართების დიდი ნაწილი წარმოდგენილია თიხამიწის (Al_2O_3 -ის) სახით. ეს ჩანართები ლითონის გლინვისას განლაგდება პწკარად (მიიღება პწკარული ჩანართები), რაც აუარესებს ფოლადის თვისებებს, განსაკუთრებით — გლინვის მიმართულების მართობული მიმართულებით. ამიტომ ხშირ შემთხვევაში განჟანგვას აწარმოებენ სხვა ძლიერი განმჟანგველებით: სილიკოკალციუმით, ფეროტიტანით, კომპლექსური განმჟანგველებით და სხვა. თხევადი ლითონის დამუშავება ციციხეში განჟანგვის პროდუქტების მოცილების საკითხს ყველა შემთხვევაში კარდინალურად წყვეტს.

აღდგენითი პერიოდის კიდევ ერთ-ერთი ძირითადი დანიშნულებაა ქიმიურ ელემენტთა კონკრეტაციების დაყვანა მზა ფოლადისათვის გათვალისწინებულ დონეებამდე ანუ ფოლადის დაყვანა მის ქიმიურ შედგენილობამდე. ამისათვის, აღდგენითი პერიოდის დასაწყისშივე აბაზანიდან იღებენ სინჯს ქიმიური ანალიზის

ჩასატარებლად. შემდეგ სხვადასხვა ფეროშენადნობების გამოყენებით ხორციელდება ღრმა დიფუზიური განუანგვა. ფეროშენადნობების მიცემის წესი და რიგითობა დამოკიდებულია მისაწოდებელი მალეგირებელი ელემენტის ფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებზე.

ფეროქრომი აბაზანას მიეცემა მაღალქრომიანი ფოლადების გამოდნობისას ალდგენითი პერიოდის დასაწყისშივე ხშირად ლუმილში მისაცემი ფეროქრომის რაოდენობა ლუმელის ტევადობის $1/4 - 1/3$ -ს აღწევს. რის გამოც აბაზანა მკვეთრად ცივდება და ლითონი შეიძლება გაიყინოს, რომლის გადნობასაც დიდი რაოდენობის ელექტროენერგია და დრო დაიხარჯება. გარდა ამისა, ფეროშენადნობის ღრმულეებში შეიძლება იყოს ტენიცი. ამ დანაკარგის თავიდან ასაცილებლად და ფეროქრომთან ერთად ტენისა და წყალბადის შემცირების მიზნით, როფებში მოთავსებულ შენადნობს აირით ახურებენ სპეციალურ მახურებელ ღუმელებში ~ 1000 C-მდე. სპეციალურ აბაზანაში ფეროქრომის შეტანისა და გადნობის შემდეგ ლუმილიდან ამოღებული წიდა გაცივების შემდეგ მომწვანო ფერისაა. რაც იმის მანიერებელია, რომ მასში გახსნილია ქრომის კანგველების დიდი რაოდენობა. აუცილებელია ასეთი წიდეებიდან ქრომის აღდგენა, რისთვისაც ხმარობენ დაფქულ ლითონურ აღმდგენლებს. ფეროქრომის გადნობის შემდეგ საჭიროა ვიცოდეთ რამდენი ქრომი გადავიდა ლითონში. ამისათვის, ლუმელის 15–20 წუთი მუშაობისა და აბაზანის კარგი არევის შემდეგ იღებენ სინჯს ქიმიური ანალიზისათვის. სინჯში ქრომის შემცველობის საფუძველზე განისაზღვრება მისაცემი ფეროქრომის საჭირო რაოდენობა, რომელიც უზრუნველყოფს ქრომის სასურველ კონცენტრაციას მზა ფოლადში. გარდა ამისა, სინჯში ქრომის შემცველობა გეიზენებს კაზმის აწონის სინუსტეს: თუ კაზმს ჩატვირთვისას დააკლდა ჯართი, მაშინ აბაზანიდან აღებულ სინჯში ქრომის შემცველობა გადააჭარბებს ფოლადის სტანდარტით გათვალისწინებულს. პირიქით, თუ ჯართი გადამეტებულად არის ჩატვირთული ლუმილში, მაშინ ქრომის შემცველობა ფოლადის სტანდარტით გათვალისწინებულზე უფრო დაბალი იქნება. საერთოდ, დნობის ნორმალური მსვლელობისას, ალდგენითი პერიოდის დაწყების წინ აბაზანაში შესატანი ქრომის რაოდენობა იანგარიშება იმაზე (0.2–0.8 %-ით ნაკლები), რასაც უნდა შეიცავდეს დაბალქრომიანი და მაღალქრომიანი ფოლადები. ფოლადში ქრომის შემცველობის საბოლოო კორექტირებისათვის ფეროქრომი აბაზანაში შეაქვთ ლუმელიდან ლითონის (ნადნობის, დნობის) გამოშვებამდე 10 წუთით ადრე.

ფეროქრომიდან ფოლადის მიერ ქრომის ათვისება პრაქტიკულად მთლიანად ხდება. ფოლადში გადადის ფეროქრომში მყოფი ქრომის ~ 98 %.

არსებობს ფეროქრომის მრავალი მარკა, რომლებიც ერთმანეთისაგან ქრომისა და ნახშირბადის შემცველობით განსხვავდებიან, დაწყებული უნახშირბადო ლითონური ქრომიდან დამთავრებული 8 % ნახშირბადის შემცველობის ფეროქრომით. რასაკვირველია, უმჯობესია გამოვიყენოთ ის ფეროქრომი, რომელიც ყველაზე იაფია, არ აჭიანურებს პროცესს და უზრუნველყოფს სასურველი ქიმიური შედგენილობის ფოლადის მიღებას. მარტო იაფი მაღალნახშირბადიანი ფეროქრომის გამოყენება ხშირად შეუძლებელია, რადგან მის მიერ შეტანილმა ნახშირბადის რაოდენობამ შეიძლება გადააჭარბოს ფოლადის ქიმიური შედგენილობით გათვალისწინებულ ნახშირბადის ზედა ზღვარს. ამ შემთხვევაში ერთდროულად გამოიყენება როგორც მაღალნახშირბადიანი, ისე საშუალონახშირბადიანი, დაბალნახშირბადიანი და უნახშირბადო ფეროქრომი. ფოლადის სოფი სპეციალური მარკა შეიცავს არა უმეტეს 0,12 % C. ამ შემთხვევაში ფოლადის ლეგირებისათვის, რასაკვირველია, გამოყენებულ უნდა იქნეს ყველაზე ძვირი უნახშირბადო ფეროქრომი.

ნიკელი გაცილებით უფრო ინერტულია ჟანგბადის მიმართ, ვიდრე ქრომი. იგი ფოლადის დნობისას პრაქტიკულად არ იუანგება. ამიტომ მისი ჩატვირთვა შეიძლება კაზმშიც და კაზმის გადნობის ან დუღილის პერიოდის დასაწყისშიც შეტანა აბაზანაში. ნიკელის ამ პერიოდში მიცემას ის უპირატესობა აქვს, რომ ელექტროლიტურ ნიკელში, დიდი რაოდენობით გახსნილი წყალბადი და გრანულირებულში შემავალი ტენი დაჟანგვის ნერიოდში მთლიანად მისორდება თხევად ლითონს. ამიტომ ნიკელის დაყვანა გამოსადნობი ფოლადის ქიმიური შედგენილობით გათვალისწინებულ შემცველობამდე უნდა დამთავრდეს ალდგენითი პერიოდის დასასრულამდე 10 წუთით ადრე. ამასთანავე, დაბალნიკელიანი ფოლადის დასაყვანად დასაშვებია არაუმეტეს 0,2 % ნიკელის მაკორექტირებელი დამატება, ხოლო მაღალნიკელიანისათვის კი - არა უმეტეს 0,6 %. ნიკელის ათვისება თითქმის 100 %-ით ხდება. ნიკელის ფუძეზე შენადნობის (ნიკელის შემცველობა შენადნობში 60 %-ზე მეტია). გამოდნობის დროს 4 %-მდე ნიკელის დაკარგვა ხდება ელექტროდის რკალში აორთქლებით.

მოლიბდენი ნიკელის მსგავსად არ იუანგება ფოლადის გამოდნობისას. ამიტომ ფერომოლიბდენის შეტანა ღუმელში შეიძლება დაჟანგვის პერიოდში. თუ მზა ფოლადი უნდა შეიცავდეს მოლიბ-

დენის დიდ რაოდენობას (10 %-ზე მეტი), მაშინ მისი ჩატვირთვა შეიძლება კაზმთან ერთად. ხშირად იყენებენ კალციუმის მოლიბდატს (CaMoO_4) და MoO_3 -ს. ამ შემთხვევაში ამ ფხვნილების შეტანა საჭიროა ჟანგვითი პერიოდის დაწყებამდე, ფოლადის გადნობის შემდეგ ნახშირბადი და რკინაში გახსნილი თითქმის ყველა ელემენტი აღადგენს მოლიბდენს. მოლიბდენის ათვისება ხდება 100 %-ით. სხვა ძვირად ღირებული ელემენტების მსგავსად, ეკონომიკურად ხელსაყრელია მოლიბდენის შემცველობა ფოლადში იყოს ქიმიური შედგენილობის ქვედა ზღვართან ახლოს.

ფოლადში დაბალფოლფრამიანი ფოლადების გამოდნობისას მიეწოდება აბაზანაში აღდგენითი პერიოდის დასაწყისში. ფოლადის მაღალი შემცველობის ფოლადების (სწრაფლმტრელი, სატვიფრე და სხვა) გამოდნობისას ფეროფოლფრამი უნდა ჩაიტვირთოს კაზმში, ხოლო თვით კაზმი სუფთა უნდა იყოს მკვნი მინარეგებისაგან. ამ შემთხვევაში დაჟანგვის პერიოდის ჩატარება და, განსაკუთრებით, დაჟანგვის პერიოდის წიდის მოხდა მიზანშეწონილი არ არის. ფეროფოლფრამი თავისი დნობის მაღალი ტემპერატურის გამო (2000°C) ისევე, როგორც ფერომოლიბდენი, უნდა შევიტანოთ ღუმელში გამოშვებამდე 30 წუთით ადრე მაინც. ფეროფოლფრამი და ფერომოლიბდენი, როგორც მძიმე შენადნობები, ქვედამდე იძირება აბაზანაში. ამიტომ თხევადი ლითონის მიერ მათი ათვისებისათვის საჭიროა ფოლადის დაყოვნება და ხშირი არევა გულმოდგინედ. მათი შეთვისება თხევადი ლითონის მიერ თითქმის 90 %-ს აღწევს.

ვანადიუმი აღვილად იჟანგება და ამიტომ იგი უნდა შევიტანოთ კარგად განჟანგულ აბაზანაში 15 წუთით ადრე მისაცემი რაოდენობიდან გამომდინარე. თელიან, რომ ვანადიუმის ათვისება 95 %.

ტიტანი ძალიან აქტიურად იჟანგება ფოლადის გამოდნობისას. ამიტომ ტიტანით ფოლადის ლეგირებას აწარმოებენ 3-8 წუთით ადრე მის გამოშვებამდე. უნდა აღინიშნოს, რომ ტიტანი ძლიერი განმჟანგველია და შეუძლია წიდიდანაც კი აღადგინოს კაპადის დიდი რაოდენობა, გადაიყვანოს იგი თხევად ლითონში და დაიჟანგოს. ტიტანის მაქსიმალურად შენარჩუნებისათვის ღუმელში შეტანამდე ხდიან ~18-24 % SiO_2 -ის შემცველ აღმდგენელ წიდას. თხევადი ლითონის ზედაპირზე დაყრიან ფეროტიტანს (იშვითად სუფთა ტიტანს) და ახლად გამოშვარ კირს მდლობ შპატთან ერთად. ასეთი წიდა კაუმიწას არ შეიცავს და ამიტომ ტიტანი იხსნება ფოლადში. თელიან, რომ აბაზანა ითვისებს 50 % ტი-

ტანს (გამოცდილი ოსტატები და მეფოლადეები ტიტანის რაოდენობას თვალთ ატყობენ ლითონის სინჯ'ხე).

ალუმინი ტიტანზე უფრო ძლიერი და მსუბუქი განიჟანგველია. ალუმინით ფოლადის ლეგირება ისევე ხდება, როგორც ტიტანით. ათვისების კოეფიციენტი 30 %. ალუმინით ლეგირებელი ფოლადების რიცხვი არც თუ ისე ბევრია.

აღდგენითი პერიოდის ხანგრძლივობა იმ დროით განისაზღვრება, რაც იხარჯება აღდგენითი წილის წარმოქმნა'ზე; წილისა და ლითონის განიჟანგვა'ზე; განიჟანგვა'ზე; ლითონის ლეგირებასა და საბოლოო განიჟანგვა'ზე. იგი მერყეობს 50 წუთიდან 2,5 საათამდე და დამოკიდებულია გამოსადნობი ფოლადის ქიმიურ შედგენილობასა და საექსპლუატაციო პირობებზე.

თ ა ვ ი IX

პრტი წილის ძვეშ დნობის ტექნოლოგია

ელექტროარკალურ ღუმელებში დნობის დანიქარების მიზნით, ხშირად მიმართავენ დნობას ერთი წილის ქვეშ. ასეთ შემთხვევაში დაჟანგვის პერიოდის წიდა არ იხდება. ასეთი დნობის მთავარი აზრი მდგომარეობს იმაში, რომ საგრძნობლად მცირდება დნობის ხანგრძლივობა. მაგრამ, რასაკვირველია, ყველაფერი ეს ხდება ლითონის ხარისხის ხარჯზე. ეს ტექნოლოგია უმთავრესად გამოიყენება დიდი ტევადობის ღუმელებში ნაკლებ საპასუხისმგებლო ფოლადების გამოდნობისას. ასეთი ტექნოლოგიის დროს განფოფორებას და კაზმის გადნობას ერთმანეთს ამოხვევენ. როგორც კი ფოსფორის შემცველობა მიაღწევს ~0.035 %-ს, ლითონს განიჟანგავენ კაუბადისა და მანგანუმით. შემდეგ ამიტკებენ ფეროქრომს და ატარებენ ხანმოკლე აღდგენის პერიოდს (20—40 წუთი). აღდგენით პერიოდში თხევადი ფოლადი განიჟანგება სიღრმული ხერხით, წიდა კი — ფეროსიცილიუმის და კოქსის ფხენილით. საბოლოო განიჟანგვას აწარმოებენ ციცხვში. თანამედროვე მძლავრ ელღუმელებში წიდას არც განიჟანგავენ აღდგენით პერიოდში. ლითონი მიჰყავთ თავის ქიმიურ შედგენილობამდე, განიჟანგვა კი ხდება ციცხვში. იქ ინერტული აირებითა და რეაგენტებით შებერვას თან სდევს ლითონის ქიმიური შედგენილობისა თუ ტემპერატურის გაერთგვაროვნება (ჰომოგენიზაცია) განიჟანგვის პროდუქტების მაქსიმალური მოცილებით, რაც საგრძნობლად აუმჯობესებს ფოლადის ხარისხს.

აღდგენითი პერიოდის შემცირების ხერხები

აღდგენითი პერიოდის ხანგრძლივობის შემცირება შესაძლებელია მასალების წინასწარი მომზადებით. მათი ღუმელში შეტანის მექანიზაციით. ლითონის ხელოვნური არევით. ტექნოლოგიის სრულყოფითა და სხვ.

წილის შექმნის დანქარების მიზნით. ხშირად წილის წარმომქმნელებს აფხვიერებენ და ერთმანეთში ურევენ, ხოლო ღუმელში სპეციალური მექანიკური ჩასაყრელით ტვირთავენ. დიდი ღუმელების შემთხვევაში, წილის წარმომქმნელების მექანიზებული მირთვა ამცირებს აღდგენით პერიოდს (80-ტონიან ღუმელს სჭირდება 3-3,5 ტონა წილის წარმომქმნელი). ლითონის ელექტრომაგნიტური არევისას ჩქარდება ჟანგბადის თხევადი ლითონიდან მოშორება და განგოგირდება. უფრო სწრაფად დნება დამატებული ფეროშენადნობები, თანაბრდება ტემპერატურა და აბაზანის ქიმიური შედგენილობა.

აღდგენითი პერიოდის შემცირება შესაძლებელია აგრეთვე დაჟანგვის პერიოდის ბოლოს, ლითონში განმაგოგირდებელი ფხვნილების შეყვრქვევით, ლითონის სინთეზური წილებით დამუშავების გამოყენებით და სხვა.

ლითონის დამუშავება ციცხვში სინთეზური წილებით

ციცხვში ლითონის სინთეზური წილებით დამუშავება დამყარებულია იმ მოვლენაზე, რომ ლითონის ჭავლი ციცხვში ჩამოსხმისას ენერგიულად აირევა წიდასთან, რაც ზრდის წილისა და ლითონის შეხების ზედაპირს. ამ ზედაპირის ზრდა კი იწვევს განჟანგვისა და განგოგირდების სრულყოფას. პრაქტიკულად დადგენილია, რომ ამ შემთხვევაში რეაქციების სისწრაფე იზრდება 100-ჯერ და მეტად. სინთეზური მაღალფუძიანი, რკინის ქვეჟანგის ძალიან დაბალი შემცველობის, დნობის დაბალი ტემპერატურის მქონე თხევადდენადი წილით შესაძლებელია თხევადი ლითონის კარგი განჟანგვა და განგოგირდება. ჟანგბადის და გოგირდის მოშორება თხევადი ლითონიდან ამცირებს არაღლითონური ჩანარობების

რაოდენობას. რითაც საგრძნობლად აუმჯობესებს ფოლადის ხარისხსა და მექანიკურ თვისებებს. რასაც ზოგიერთი ლეგირებული ფოლადისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს.

სინთეზურ წიდას ადნობენ რკალურ ღუმელებში. მისი ტემპერატურა ღუმელში დაახლოებით 1550–1600 °C-ია. გამოშვებამდე 30 წუთით ადრე, მასში წყვეტენ საკასმე მასალების ჩატვირთვას და გადაახერებენ დაახლოებით 1750 °C-მდე. ელექტროენერგიის ხარჯი დაახლოებით 1500–2500 კვტ.საათია ერთ ტონა წიდაზე. ელექტროენერგიის ხარჯი დამოკიდებულია გამოსადნობი წილის ქიმიურ შედგენილობაზე. სინთეზური წილების ქიმიური შედგენილობა დამოკიდებულია გამოსადნობი ფოლადის მარკაზე. ზოგიერთი სინთეზური წილის ქიმიური შედგენილობა ასეთია: 1. 95–98 % Al_2O_3 ; 0.2–0.65 % SiO_2 ; 0.3–0.6 % FeO . 2. 40–45 % Al_2O_3 ; 48–55 % CaO ; 2–3 % SiO_2 ; 0.3–0.6 % FeO . 3. 52–55 % CaO ; 38–42 % Al_2O_3 ; 2–3 % მინარეები (SiO_2 , FeO , MgO , Cr_2O_3 და ა.შ.). ბოლო წილის დნობის ტემპერატურაა 1400 °C. მას ახასიათებს ლითონი-წილის გამყოფი ხედაპირზე ფაზათშორისი დატენიანების მაღალი მანქენებელი და დაბალი სიბლანტე. ასეთი წილებით დამუშავებისას გოგირდის შემცველობა ლითონში 0,001–0,006 %-მდე ვარდება, რაც იწვევს არალითონური ჩანართების რაოდენობის შემცირებას 4-ჯერ.

მართალია, სინთეზური წილების გამოდნობა მოითხოვს ელექტროენერგიის დიდ ხარჯს. მაგრამ შესაძლებელია ეკონომიკურად ის გადაიფაროს აღდგენითი პერიოდის ხანგრძლივობის შემცირების ხარჯზე (აღდგენითი პერიოდი მცირდება დაახლოებით 30 წუთით). ეს კი იწვევს ერთ ტონა გამოსადნობ ფოლადზე ელექტროენერგიის ხარჯის საგრძნობ შემცირებას.

თ ა ვ ი XII

უხვნილისებრი მასალების ბამოყენება

ელექტრორკალურ ღუმელში დნობის დანქარების ერთ-ერთ ხერხს წარმოადგენს უხვნილისებრი მასალების შეფურქვევა თხევად აბაზანაში. მათი საშუალებით შეიძლება დანქარდეს დნობის ძირითადი პროცესები: განფოსფორება; გაუნახშირბადოება; განგოგირდება; განჟანგვა. როგორც უკვე იყო აღნიშნული, უხვნილისებრი მასალების შებერვისას იზრდება შეხების ფართობი წილის წარ-

მიმქმნელებსა და თხევად ლითონს შორის, ძირითადად რის გამოც ნქარდება რეაქციები.

ფხენილისებრი მასალების შეფერქვევა ლითონში ხდება აირების (ჟანგბადი, ინერტული აირი, აზოტი, ჰაერი) მეშვეობით. იმისდა მიხედვით, თუ რა მიზანი აქვს ფხენილისებრი მასალების თხევად ლითონში შეყვანას.

განფოსფორების შემთხვევაში გამოყენებულ უნდა იქნეს ჟანგბადი. ჟანგბადი საჭიროა ფოსფორის და ნახშირბადის დასაქანგად. იმის გამო, რომ ფოსფორის მოშორება ნაწილობრივ ხდება კაჟიმის გადნობისას და ძირითადად დაჟანგვის პერიოდში, სუფთა ჟანგბადის გამოყენება ამ მიზნებისათვის შეუძლებელია. რადგან ეგ სითერმული ჟანგებით რეაქციების შედეგად თხევადი ლითონისა და წილის ტემპერატურა სწრაფად იზრდება და იქმნება ფოსფორის წილიდან უკან ლითონში გადასვლის პირობები. ფხენილისებრი მასალების შეფერქვევა (ახლად გამოშვარი კირის, რკინის მადნისა და მღლობი შპატის ნარევი პროპორციით 7:2:1) იწყება გადნობის პერიოდის ბოლოს, როცა ლითონის ტემპერატურაა 1540–1560 °C. შეფერქვევისას ფხენილისებრი მასალების ხარჯია ~19–28 კგ/ტ. ფხენილების შებერვის ინტენსიურობა უნდა იყოს 4.5–6.0 კგ/ტ.წო ჟანგბადის 4–6 ატ წნევით. 5–15 წუთის განმავლობაში შეფერქვევის შემდეგ (ღუმელის ტევალობისა და შესაბერი მასალების რაოდენობისგან დამოკიდებულებით) ფოსფორის შემცველობა ლითონში მკირდება 0.008 %-მდე. შემდეგ უბერავენ სუფთა ჟანგბადს, თუ საჭიროა ნახშირბადის ამოწვა და იხდება დაჟანგვის პერიოდის წიდა. შებერვის შედეგად განფოსფორების სინქარე იზრდება ~10-ჯერ. გაუნახშირბადობისა ~3–4-ჯერ, ვიდრე რკინის მადნის გამოყენების შემთხვევაში. დაჟანგვის პერიოდი მკირდება ~50 %-ით, რაც, თავის მხრივ, საგრძობლად ზრდის ღუმელის წარმადობას.

განფოსფორების რეაქციის თითქმის ბოლომდე მიყვანა აიხსნება იმით, რომ მიმდინარე პროცესი თითქმის მიდის წონასწორულ მდგომარეობამდე, რასაც ხელს უწყობს წილის ოპტიმალური ქიმიური შედგენილობა. ქიმიური შედგენილობის შერჩევა გულისხმობს ისეთი წილის აღებას, რომლის დროსაც წიდასა და თხევად ლითონს შორის ფოსფორის განაწილების კოეფიციენტი მოცემული პირობებისას მაქსიმუმს აღწევს. მღლობი შპატის შეყვანა ფხენილებში ამცირებს წარმოქმნილი წილის სიბლანტეს, რაც აგრეთვე უწყობს ხელს ფოსფორის გადასვლას თხევადი ლითონიდან წიდაში.

ზოგჯერ განფოსფორების მიზნით ფხენილისებრი წილების გამოყენებისას საჭიროდ აღარ თელიან გადნობის პერიოდის წილის

მოხდას. როგორც ცნობილია, კასმის გადნობის შემდეგ იხდება წილის ~ 80%.

ფხენილისებრი მასალები შესაძლებელია განგოგირდების-თვისაც გამოიყენოს ადდგენით პერიოდში იმ პირობით, თუ თხევად ლითონში ფხენილების შესაფრქვევად გამოიყენებული იქნება ინერტული აირი (უფრო დაწერილებით იხ. განგოგირდება).

თ ა ვ ი XIII

დნობის თავისებურებანი მჟავეამონაგიან ღუმელებში

მჟავეამონაგიანი ღუმელები უმთავრესად მცირე ტევადობისაა და გამოიყენება როგორც სადნობი აგრეგატი სანამოსხმო საწარმოებში, სადაც ჩამოსხმება პატარა და თხელკედლიანი სხივლები.

მჟავე ელექტროღუმელების ამოგება მთლიანად დინასის ცეცხლგამძლე აგურებითა და კაუმიწით ხდება. ამიტომ წიდეები გადაჯერებულია კაუმიწით. მჟავე წიდეები მეტად ბლანტია, რაც ხელს უშლის თხევად ლითონსა და წიდას შორის რეაქციების მიმდინარეობას. ამავე დროს, წიდაში კაუმიწის დიდი რაოდენობა გამორიცხავს განგოგირდებისა და განფოსფორების ჩატარებას. თანაც, მჟავე ამონაგში დნობის მიმდინარეობისას შესაძლებელია კაუბადის აღდგენა ღუმელის ფერდობებიდან და ქვედიდან ნახშირბადით და ლითონში გახსნილი ჟანგბადის მიმართ უფრო აქტიური სხვა ელემენტებით. ეს გარემოება ზღუდავს მჟავეამონაგიან ღუმელებში მაღალტემპერატურული ფოლადების გამოდნობას. ამიტომ ამ ღუმელებში მხოლოდ ქრომნიკელიანი, ქრომისლიბდენიანი და სხვა საშუალონახშირბადიანი ფოლადები დნება, ხოლო ისეთი ფოლადების გამოდნობა, რომლებიც შეიცავს ალუმინს, ცირკონიუმს, ტიტანს ან დიდი რაოდენობით მანგანუმს პრაქტიკულად შეუძლებელია.

ჩამოთვლილი ნაკლოვანების მიუხედავად, მჟავეამონაგიან ღუმელებში გამოდნობას გააჩნია დადებითი მხარეები. რომლებიც შეუცვლელს ხდიან მათ ზოგიერთ წარმოებაში. ფუძემონაგიანი ღუმელების წიდეებთან შედარებით, მჟავე წიდეებს უფრო მეტი ომური წინაღობა ახასიათებს, რაც საშუალებას იძლევა ღუმელი უფრო ნაკლები სიგრძის რკალით გადახურდეს ტრანსფორმატორის

მაღალ საფეხურზე მუშაობისას. ამ დროს საგრძნობლად იზრდება ლითონისადმი გადაცემული სითბოს რაოდენობა და უმჯობესდება დანადგარის მ.ქ.კ.

მუავე ელექტრორკალურ ღუმელებში იმის გამო, რომ არ ხდება განგოგირდება და განფოსფორება მნიშვნელობა არა აქვს აბაზანის ფორმას. ღუმელის გეომეტრიული ზომები შეიძლება გაანგარიშებულ იქნეს მარტო თბოდანაკარგების შეკვლის გათვალისწინებით. რადგან თხევადი ლითონის 'სუდაპირის' შემცირებით მცირდება სითბოს დანაკარგები. ამიტომ მუავეამონაგიანი ღუმელების აბაზანის სიღრმე უფრო მცტია. თბური დანაკარგების შემცირებით მცირდება ელექტროენერჯის ხარჯიც. ამასთანავე, ღრმა აბაზანის შემთხვევაში ლითონის გადნობის პროცესში ელექტროდების ქვევით მოძრაობისას, ჩამდნარი ლითონის 'სუდაპირთან' შეხებამდე ქვედზე გროვდება დიდი რაოდენობით თხევადი ლითონი, რაც ამცირებს დნობის ხანგრძლივობას. გარდა ამისა, რადგან მუავეამონაგიანი ღუმელის აბაზანა უფრო ღრმაა, ხოლო თხევადი ლითონის ღუმელში ყოფნის დრო მცირე, შესაძლებელია ღუმელის ოპტიმალური ტევადობის საგრძნობი ზრდა (100 %-ით 1 ტონამდე ღუმელებში და 75 %-ით 5 ტონამდე ღუმელებში).

ფუძემონაგიან ღუმელებთან შედარებით, დნობის თხევადი პერიოდის ხანგრძლივობა (დაუბნების და აღდგენითი პერიოდების ხანგრძლივობების ჯამი) მუავეამონაგიან ღუმელებში შედარებით მცირეა განგოგირდება-განფოსფორების გამოირიცხვისა და მალევირებლების ნაკლები რაოდენობის გამო. ამიტომ გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობის წილი მთელი დნობის ხანგრძლივობასთან შედარებით დიდია. ამ პერიოდში კი ღუმელის ტრანსფორმატორი მუშაობს მთელი სიმძლავრით. რაც მისი გამოყენების მაღალ კოეფიციენტზე მეტყველებს. რადგან მუავეამონაგიან ღუმელებში გადნობის პერიოდს დნობის დიდი დრო მიაქვს. ამიტომ მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ მძლავრი ტრანსფორმატორები და შემცირდეს გადნობის პერიოდი.

საერთოდ, დნობის ხანგრძლივობის სიმცირე და მუავე ცეცხლგამძლე მასალების მაღალი ტემპერატურული შედეგობა უზრუნველყოფს ამონაგის გაცილებით ხანგრძლივ მუშაობას. ფუძე ღუმელის ამონაგთან შედარებით. პირველი რამდენჯერმე აღემატება მეორეს. ამასთან, მუავე ცეცხლგამძლე მასალების ღირებულება საგრძნობლად ნაკლებია ფუძე ცეცხლგამძლე მასალებისასზე (მაგნეზიტი). ამიტომ ხვედრითი დანახარჯები ღუმელის ამოგებაზე მუავე ღუმელებში 2-4-ჯერ უფრო ნაკლებია.

მუავე ამონაგის მაღალი ტემპერატურული შედეგობა ღუმელის პერიოდული მუშაობისას საშუალებას იძლევა ამონაგი ვამუშაოთ

დროდადრო (ორცვლიანი სამუშაო დღე) გაცივებისა და გახე-
რებისას ზიანის მიყენების გარეშე. ფუქემონაგიან ლუმელის ასეთი
პერიოდული მუშაობა შეუძლებელია, რადგან ლუმელის ამონაგი
იზარება (მაგნიზიტის ცეცხლგამძლე მასალის ალოტროპიული
გარდაქმნის გამო).

ამრიგად, მუავეამონაგიანი ლუმელების დადებითი და უარყო-
ფითი მხარეების გათვალისწინებით, ისინი უმეტესად გამოიყე-
ნებიან საჩამოსხმო საამქროებში, სადაც უკან დაბრუნებული
გასადნობი ფოლადის დიდი რაოდენობაა. ამიტომაც კაშიში
ხმარობენ დამატებით ფუქემონაგიან ლუმელებში გამოდნობილ
ლითონს. ეს გარემოება, რასაკვირველია, უარყოფითად მოქმედებს
მუავეამონაგიან ლუმელებში გამოდნობილ ფოლადის ღირებუ-
ლებასზე.

დნობის ტექნოლოგია. როგორც წინა პარაგრაფებიდან
გაირკვა, არსებობს დიდი პრინციპული განსხვავება მუავე და
ფუქემონაგიან ლუმელებში ფოლადის დნობისას. ძირითადად ეს
ეხება განგოგირდების და განფოსფორების საკითხს. რადგან ეს
პროცესი პრაქტიკულად არ ხორციელდება მუავეამონაგიან ლუმე-
ლებში, ჟანგითი პროცესის დროს ხდება მხოლოდ ლითონში
გახსნილი აირების მოშორება, რისთვისაც საჭირო არ არის დიდი
რაოდენობით ნახშირბადის ამოწვა (დუღილის ჩატარება), რაც
ფუქემონაგიანი ლუმელებისთვისაა აუცილებელი. მუავეამონაგიან
ლუმელებში დნობა შეიძლება წარემართოთ დუღილის ჩაუტარებ-
ლადაც, რასაც იშვიათად გამოიყენებენ ქრომნიკელიანი, ქრომ-
მილიბდენიანი და სხვა ლეგირებული ფოლადების გამოსადნობად
მალეგირებული ელემენტების ამოწვის შემცირების მიზნით.

საკაზმე მასალები. ვინაიდან მუავე პროცესში ფოსფორისა
და გოგირდის მოშორება შეუძლებელია, კაში ისე უნდა აირჩეს,
რომ გადნობისათვის მათი შემცველობა ლითონში 0,01 %-ით
უფრო დაბალი იყოს, ვიდრე ფოლადის ქიმიური შედგენილობით
არის გათვალისწინებული (მაშინ, როდესაც ფუქემონაგიანი ლუმე-
ლის კაშიში S-სა და P-ის შემცველობა 0,05 %-ის დონეზეა დასაშვებ-
ი). ამიტომ მთლიანად თავისი წარმოების ნარჩენების (ნამატები,
სასხმელები, ზოდების ჩამონატრები) მუავე ლუმელებში გამოყენება
მიზანშეწონილი არ არის, იმის გამო, რომ ყოველი გამოდნობისას
ხორციელდება ლითონის ლეგირება ფერომაგანუმით და ფეროსი-
ლიციუმით, რომლებიც შეიცავენ უფრო მეტ გოგირდსა და ფოს-
ფორს, ვიდრე გამოსადნობი ფოლადი. ამიტომ კაშიში მხოლოდ
ნარჩენების გამოყენებისას მათში მატულობს ამ ელემენტების
რაოდენობა და მისი მრავალჯერ გადადნობის შემდეგ შეიძლება

დასაშვებსაც გადააჭარბოს. ამ მიზეზებით წარმოების საკუთარი ნარჩენების რაოდენობა კაზმში არ უნდა აღემატებოდეს 50 %-ს. ამასთან ერთად, გასათვალისწინებელია, რომ გადასადნობად დაბრუნებული ნარჩენების შედაპირსე შემცხვარი საყალიბე მიწა აძნელებს ელექტრორკალის შიკვრას. ჯართის დანარჩენი 50 % უნდა შეივსოს ყუძე ფოლადსადნობ აგრეგატებში გამოდნობილი ფოლადის ნარჩენებით.

კაზმი არ უნდა იყოს დაჟანგული. რადგან რკინის ქვეჟანგი უღნითავე ლუმელის ქვედს და ამცირებს მის მედეგობას. ცნობილია, რომ ლუმელის ახალი ქვედი შეიცავს 98.5 % SiO_2 -ს და 0.6 % FeO -ს. 200 დნობის შემდეგ – 78.9 % SiO_2 -ს და 7.75 % FeO -ს. ხოლო 500 დნობის შემდეგ – 66.4 % SiO_2 -ს და 22.1 % FeO -ს. რკინის ქვეჟანგის ქვედსე მავნე გავლენის თავიდან აცილება შესაძლებელია კაზმში სუფთა ქვიშის დამატებით. რომელიც აწიდავს რკინის ქვეჟანგის ნაწილს.

მუავე წიდეები ძალიან ბლანტია და ამიტომ მასში რკინის ქვეჟანგის აქტიურობა დაბალია, რაც ამცირებს ნახშირბადის ამოწვის სინქარეს. ამავ დროს, ბლანტი მუავე წიდეები ნაკლებად შეღწევადა ატმოსფეროს აირებისათვის. ამიტომ ნახშირბადის ამოწვის ანუ დუღილის ჩატარებას უფრო ნაკლები მნიშვნელობა ენიჭება. ვიდრე – ფუძემოხაზიან ლუმელებში. ამის დასადასტურებლად შეიძლება მოვიყვანოთ მაგალითი: 0.3 % ნახშირბადის ერთ საათში ამოწვის სინქარის დროსაც კი ლითონში აირების შემცველობა 1,5–2-ჯერ ნაკლებია ფუძემოხაზიან ლუმელებთან შედარებით. ამიტომ კაზმი ისე უნდა შეირჩეს ნახშირბადის მიხედვით. რომ განხორციელდეს მხოლოდ 0.1–0.2 % ნახშირბადის ამოწვა.

გადნობის პერიოდი მიმდინრეობს ისევე, როგორც ფუძემოხაზიან ლუმელებში. რადგან მუავეამოხაზიანი ლუმელების კაზმის შემადგენელი კომპონენტები მცირე ხომისაა. ამიტომ ხშირად ხდება გადნობისას მათი შეღწეობა და ე.წ. „ხიდების“ წარმოქმნა. ამ დროს, ერთმანეთში შეღწეობილი კაზმი აღარ ჩადის ქვევით და თანდათან შორდება ელექტრორკალს. ელექტროდებს ქვემ რჩება გამდნარი კაზმის მცირე ნაწილი, რომელიც შეიძლება გადახურდეს და ალადაგინოს ქვედის კაჟიწა. ამ შემთხვევაში ლუმელიდან გამონაბოლქვის სახით გამოიყოფა თეთრი კვამლი. ასეთ დროს ლუმელი გამოირთება კაზმის ჩამონგრევის მიზნით.

რკინისა და სხვა მალეგირებული ელემენტების ამოწვის შემცირების მიზნით, გადნობისას ლუმელში შეაქეთ წინა დნობის გაჯერებული წიდა. გადნობის დროს წიდას აქვს დაახლოებით

შემდეგი შედგენილობა: 40–45 % SiO_2 , 6–7 % CaO , 15–20 % MnO , 30–40 % FeO , 2–5 % Al_2O_3 . რაც უფრო მცირეა გადნობისას ყოლადში ნახშირბადის შემცველობა, მით ნაკლებია მანგანუმისა და კაუბადის შემცველობაც. ლითონის ტემპერატურა უნდა იყოს ~1570–1580 °C. იმ შემთხვევაში, თუ საჭიროა ლითონის დანახშირბადიანება, ღუმელში უნდა შევიტანოთ ნახშირბადის ნარჩენების შემცველი დაბალფოსფორიანი თუჯი.

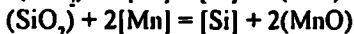
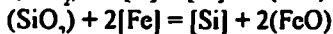
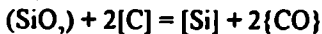
დაჟანგვის პერიოდი. მისი დანიშნულებაა თხევად რკინაში გახსნილი სხვა ლითონების შემცველობის შეიცირება და ტემპერატურის გათანაბრება. საერთოდ, მჟავამომნაგვიან ღუმელებში გამოდნობილ ფოლადებს ხშირად უხდებათ ტენთან შეხება (ტენიანი საჩამოსხმო ღარი, ტენიანი ყალიბები, საყალიბე მიწის შემკვრელი ორგანული ნაერთები და სხვა). იქმნება საშიშროება, რომ თხევად ლითონში წყალბადის რაოდენობამ კრიტიკულ ზღვარს გადააჭარბოს. რადგან კაზმში ასეთი ნარჩენების 50 %-ია, საჭიროა ლითონის ხანგრძლივი დუღილი. ამასთან, დუღილის პერიოდში თხევადი ლითონი თავისუფლდება არალითონური ჩანარებისაგანაც.

გადნობის პერიოდის წილები შეიცავს 40 %-ზე მეტ რკინის ქვეჟანგს. ამიტომ ლითონის სათანადო გადახურებით შესაძლებელია ნახშირბადის ამოწვა რკინის მადნის დაუმატებლადაც. ამ დროს ნახშირბადის ამოწვის სიჩქარე საათში (0.2–0.3 %-ს) აღწევს. დაბალნახშირბადიანი ფოლადის დნობისას შესაძლებელია რკინის მადნისა და აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებაც. ამ შემთხვევაში გაუნახშირბადოების სიჩქარე აღწევს 0.4–0.6 %C/საათში. რკინის მადნის გამოყენების შემთხვევაში აუცილებელია მისი მცირე ულუფებით შეტანა, რადგან რკინის ქვეჟანგის დიდი რაოდენობით შემცველობამ წიდაში შეიძლება გამოიწვიოს ღუმელის ამონაგის დაზიანება, ამოჭმა.

თხევადი ლითონის დუღილის დაჩქარება შეიძლება აგრეთვე წიდაში ახლადგამომწვარი კირის დამატებით. ამ დროს უფრო ძლიერი ფუძე ჟანგეული CaO ათავისუფლებს სილიკატური ნაერთებიდან უფრო ნაკლები ფუძე თვისებების ჟანგეულებს FeO -ს და MnO -ს. ამასთან, წიდა ხდება ადვილდნობადი და თხევადდენადი, იზრდება FeO -ს და MnO -ს აქტიურობა წიდაში და დუღილიც დაჩქარებულად მიმდინარეობს. აუცილებლად მხედველობაშია მისაღები ის გარემოება, რომ CaO ძლიერი ფუძე ჟანგეულია და მისი დიდი რაოდენობით წიდაში შეყვანა ძალიან დაზიანებს ღუმელის მჟავე ამონაგს. პრაქტიკაში CaO -ს რაოდენობა წილებში საშუალოდ 6–8 %-მდე აჰყავთ.

მუავე წილებში MnO-ც ნაკლებ აქტიურია. ამიტომ მისი დაჟანგვა თხევად ლითონში თითქმის ზოლომდე მიდის. თუ კაჰში მანგანუმის დიდი რაოდენობაა, მაშინ იგი მთლიანად დაიჟანგება. გადავა წიდაში და CaO-ს და FeO-ს მზგავსად შეიძლება ღუმელის ამონაგი დაახიანოს.

დაჟანგვის პერიოდში შესაძლებელია კაჰბადის აღდგენაც შემდეგი რეაქციებით:



პირველი რეაქცია არაშეიქცევადია. რადგან რეაქციის ერთ-ერთი პროდუქტი აირია. მეორე და მესამე რეაქციები კი შეიქცევადია და მათი მიმართულება დამოკიდებულია ლითონის ტემპერატურაზე. წილისა და ლითონის შედგენილობასა და წილის ფიზიკურ მდგომარეობაზე. ეს რეაქციები, ამავე დროს, ენდოთერმულია. ამიტომ ტემპერატურის მომატება ხელს უწყობს კაჰბადის აღდგენას. კარგად გახურებულ ფოლადში ნახშირბადი აღდგენს ამონაგის კაჰბადს, ხოლო აღდგენილი კაჰბადი თხევადი ლითონისა და წილის გამყოფ ზედანირზე ისე იჟანგება რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგებით. თუ რკინისა და მანგანუმის ქვეჟანგების შემცველობა წიდაში მცირეა ან წიდა ისეთი ბლანტია, რომ აი ჟანგულების გადაადგილება თხევადი ლითონისა და წილის გამყოფ ზედაპირისაკენ გაძნელებულია, მაშინ ლითონში იხრდება კაჰბადის შემცველობა.

ამრიგად, მუავეამონაგინ ღუმელებში ტემპერატურის, წიდაში რკინის ქვეჟანგის და წილის ფიზიკური მდგომარეობის მიხედვით. შესაძლებელია არა მარტო ნახშირბადის და მანგანუმის ამოწვის ან Mn-ის აღდგენის რეკულირება. არამედ კაჰბადის დაჟანგვის და აღდგენის რეაქციის მიმართულების დადგენა. გადნობის ბოლოს წილის დაახლოებითი ქიმიური შედგენილობა შემდეგია: 50-55 % SiO₂, 10-15 % MnO, 25-30 % FeO, 7-8 % CaO, 2-3 % Al₂O₃, ტემპერატურა 1600-1620 °C.

აღდგენითი პერიოდი. რადგან მუავეამონაგინ ღუმელებში შეუძლებელია განგოგირდების ჩატარება და შესლუდულია ლეგირების შესაძლებლობებიც, ამიტომ აღდგენითი პერიოდი ტექნოლოგიით ან ძალიან გამარტივებულია, ან სრულებით უგუნველყოფილია.

ნახშირბადიანი ფოლადების გამოდნობისას მთელი აღდგენითი პერიოდის დანიშნულება განისაზღვრება მხოლოდ ფოლადის განჟანგვით. განჟანგვა ხორციელდება ღუმელის ამონაგიდან ან

წიდიდან კაუბადის აღდგენით. ამისათვის წიდასუ დაყრიან მშრალ ქვიშას, რის წყალობითაც წიდაში კაუმიწის შემცველობა 52-55 %-ე იზრდება. ამისთანა წიდასუ დაყრიან კოქსის ფხენილს, ღუმელის ჰერმეტიულად ხურავენ და აჩერებენ რამდენიმე წუთს. ასეთ პირობებში ძნელდება ღუმელის ამონაგიდან და წიდიდან აღდგენილი კაუბადის დაჟანგვა, რადგან კაუმიწის ასეთი შემცველობის წიდა მეტად ბლანტია. კაუბადის აღდგენის სისქარე ამ დროს აღწევს 0,4 %-ს საათში. თუ საჭიროა უფრო მეტი კაუბადის აღდგენა, მაშინ კაუმიწის შემცველობას წიდაში 60 %-ე გასრდიან. შემდეგ ღუმელში შეიტანენ ფერომანგანუმსა და ფეროსილიციუმს. საბოლოო განჟანგვას აწარმოებენ ალუმინით. წიდას შემდგენილობა დაახლოებით შემდეგია: 50-52 % SiO_2 , 15-20 % MnO , 10-12 % FeO , 8-9 % CaO , 3-5 % Al_2O_3 .

VII ბანყოფილება

საკაციალური ელემენტ(ომეტალურბია

თ ა ვ ი I

ფოლადის და შენადნობების ვაკუუმური მეტალურბია

ყველა ქვეყნის ერთ-ერთ ძირითად საკითხად რჩება მეტალურგიის განვითარება. ლითონების გარეშე ვერ განვითარდება თანამედროვეობის ევროპ ერთი დარგი. ამიტომაც არის, რომ თანამედროვე მეტალურგიის განვითარებას ესოდენ დიდი ყურადღება ექცევა. მეტალურგიის განვითარებაში არ უნდა ვიგულისხმოთ გამოდნობილი ფოლადებისა და შენადნობების რაოდენობა. ტექნიკის განვითარება მოითხოვს ყველა დარგისაგან. და მათ შორის მეტალურგიისაგან, არა რაოდენობრივ, არამედ თვისობრივ გაუმჯობესებას. მართლაც, შეუძლებელი იქნებოდა თანამედროვე მანქანების, დაზგების, ბირთვული ტექნიკის და ა.შ. შექმნა, თუ არ გაუმჯობესდებოდა ფოლადისა და შენადნობის ხარისხი.

ვაკუუმური მეტალურგია სწორედ ის მიმართულებაა თანამედროვე მეტალურგიაში, რომელიც ხელს უწყობს ლითონების ხარისხის გაუმჯობესებას. ტექნოლოგიურ პროცესში ვაკუუმის გამოყენება მეტალურგს აძლევს ლითონში მისი ხარისხის გამაუარესებელ ნივთიერებათა და ნაერთთა რაოდენობის შემცირების საშუალებას.

ამის მიღწევა შესაძლოა, ერთი მხრივ, ლითონის ატმოსფეროსთან შეხების მოსპობით, ზოგიერთ შემთხვევაში ცეცხლგამძლე სადინარებსა და აბაზანებში მიმდინარე ტექნოლოგიური პროცესების გაუქმებით და მეორე მხრივ, - ლითონების დნობა და დაყოვნება დაბალი წნევის ქვეშ საშუალებას იძლევა მოვაცილოთ თხევად ლითონის ის ჩანარები. რომლებიც გადავიდა მასში ჯართიდან ან არსებული ტექნოლოგიური პროცესების მსვლელობის შედეგად. ბუნებრივია, რომ სანამ მანქანათმშენებლობა არ შექმნიდა ისეთ ვაკუუმურ დანადგარებს, რომელთაც შეეძლებოდათ მცირე დროში ამოეჭუმბა დიდი მოცულობებიდან აირები.

ვერ განვითარდებოდა ვაკუუმური მეტალურგია (კ. ამეაჩიად, შექმნილია ისეთი ტუმბოები, რომელთაც შეუძლიათ ერთი წამის განმავლობაში ამოტუმბონ ასობით კუბური მეტრი და შექმნან 100 ნ/მ^2 (1 მმ Hg)* რიგის გაიშვიათება. შექმნილია ასევე მაღალი გაიშვიათების (10^{-7} მმ Hg) მაღალმწარმოებლური ტუმბოები. ასეთი ტუმბოების მეშვეობით შესაძლებელია ათობით და ასობით ტონა ლითონის როგორც დნობა, ასევე დამუშავება ვაკუუმში.

ამჟამად შესაძლებელია, რკალურ ვაკუუმურ ღუმელებში $1,5$ მეტრის სიგრძის და $50-60$ ტ მასის სხმულების გამოდნობა. ლითონის გამოდნობა ხდება აგრეთვე ელექტრონულ-სხივურ ღუმელებში 10^5 მმ Hg გაიშვიათებისას.

ვაკუუმური მეტალურგიის ძირითადი ამოცანები შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგ მუხლებად:

1. სპეციალურად ლეგირებული ფოლადების და შენადნობების თვისებების გაუმჯობესება;

2. ხარისხოვანი და ჩვეულებრივი ფოლადების თვისებების გაუმჯობესება;

3. ახალი ტექნოლოგიის შემუშავება და ფოლადის წარმოების არსებული ტექნოლოგიის გადახალისება;

4. განსაკუთრებით სუფთა (ზესუფთა) ლითონებისა და შენადნობების გამოდნობა, მათ შორის ძნელდნობადი ლითონებისა.

ჩამოთვლილი მუხლების განხორციელება შესაძლებელია იმიტომ, რომ ვაკუუმირებისას გამოიყოფა ლითონში გახსნილი აირები (წყალბადი, ჟანგბადი, აზოტი), არალითონური ჩანართები, იოლად აქროლადი ფერადი ლითონები (სპილენძი, ტყვია, თუთია, დარიშხანი და ა.შ.). შესაძლებელია აგრეთვე ლითონებში ნახშირბადის შემცველობის მნიშვნელოვანი შემცირება და კიდევ ბევრი სასიკეთო რამ შეუძლია ვაკუუმის გამოყენებას მეტალურგიაში. რასაც თანდათანობით გავცნობით შემდგომში.

რასაკვირველია, ვაკუუმური მეტალურგიის შესწავლისა და კარგად ათვისებისათვის საჭიროა წარმოდგენა გექონდეს თვით ვაკუუმის შესახებ. რას წარმოადგენს იგი, როგორ მიიღება, როგორ იზომება, როგორ გამოითვლება ვაკუუმური დანადგარების სიმძლავრე და სხვა. გარდა ამისა, ვაკუუმური დნობის პროცესი

* ვერცხლისწყლის სვეტის 1 მილიმეტრი ქართულად ასე აღინიშნება: 1 მმ Hg. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ერთეულის ხმარება დაუშვებელია 1980 წლის 1 იანვრიდან. ამავე დროს $1 \text{ მმ Hg} = 133,322 \text{ პა} = 133,322 \text{ ნ/მ}^2$. საყურადღებოა, რომ ასეთი მკაცრი აკრძალვის მიუხედავად ერთეული ვერცხლისწყლის სვეტის 1 მილიმეტრი ისევ ფართოდ გამოიყენება იმ თანამედროვე ნაშრომებში, რომლებიც ეხება ვაკუუმის თემას.

საგრძობობლად განსხვავდება ჩვეულებრივ სადნობ დაანადგარებში დნობის პროცესებისაგან. განსხვავებულია აგრეთვე თხევად ლითონებში მიმდინარე რეაქციების ფიზიკურ-ქიმიური საფუძვლები. რაც უმთავრესად პარციალური წნევების ცვლილებით არის გამოწვეული და ა.შ.

ამიტომ „ელექტროდნობის სპეციალური პროცესების“ საგნის აღნიშნული ნაწილის შესწავლისას გავეცნობით ვაკუუმურ ტუმბოებს; ვაკუუმის გაზომვას; მეტალურგიული დანადგარების ვაკუუმური სისტემების გამოთვლის ხერხებს; ვაკუუმური მეტალურგიული პროცესების ფიზიკურ-ქიმიურ საფუძვლებს; ვაკუუმურ დნობებს ინდუქციურ, რკალურ და ელექტრონულ-სხივურ ღუმელებში.

7.1. მეტალურგიული დანადგარების ვაკუუმური სისტემების გამოთვლის ხერხები

7.1.1. ვაკუუმური სისტემები

ვაკუუმური სისტემები დანიშნულების მიხედვით იყოფა სამ ნაწილად: დაბალ ანუ უხეშ ვაკუუმურ სისტემად, როცა ნარჩენი ატმოსფერული წნევაა 0.1 მმ Hg; საშუალო ვაკუუმურ, როცა ნარჩენი ატმოსფერული წნევაა 0.1–0.001 მმ Hg და მაღალვაკუუმურ სისტემად, როცა ნარჩენი ატმოსფერული წნევა ნაკლებია. ვიდრე 0.001 მმ Hg-სა.

დაბალი ვაკუუმის დანადგარები აღჭურვილია ფორვაკუუმური ანუ წინავაკუუმური ტუმბოთი, ანდა – ორთქლწყლიანი ექვტორული ტუმბოთი. საშუალო ვაკუუმური დანადგარები მუშაობს ორთქლჭაველური და ფორვაკუუმური ტუმბოებით. ხანდახან ამ ორ ტუმბოს შორის ათავსებენ ოროტორიან ტუმბოსაც. მაღალ-ვაკუუმური ანუ ღრმავაკუუმური დანადგარები აღჭურვილია ორთქლჭაველიანი დიფუზიური ტუმბოებით ფორვაკუუმურ ტუმბოებთან ერთად.

ყოველი ვაკუუმური სისტემა ხასიათდება „ზღვრული ვაკუუმით“ ანუ იმ უმცირესი ნარჩენი წნევით, რომელიც შეიძლება იქნეს მიღწეული დანადგარში დიდი ხნის ამოტუმბვის შემდეგ, ლითონის გასახურებლად ან გასადნობად დენის ჩართვის გარეშე. ზღვრული ვაკუუმის სიდიდე დამოკიდებულია ვაკუუმის დანადგარის კორპუსის ხარისხიანობაზე და მასში მოთავსებული

ნაწილებისა და კედლების ზედაპირიდან აირების დესორბციაზე. დანადგარის პერმეტულობასა და ტუმბოების ზღვრულ გაიშვითებაზე.

ვაკუუმური სისტემის მეორე მახასიათებელია ე.წ. „სამუშაო ვაკუუმი“. ეს ის წნევაა, რომელიც წარმოიქმნება დანადგარში ლითონების დნობის ან გახურებისას. თუ ზღვრული ვაკუუმი დანადგარის მუდმივი მახასიათებელია, სამუშაო ვაკუუმი შეიძლება იცვლებოდეს იმისდა მიხედვით, თუ რა ტექნოლოგიური პროცესი მიმდინარეობს დანადგარში და აგრეთვე რა მასალა ხურდება ან დნება.

საერთოდ, ვაკუუმური სისტემების გამოთვლა დაიყვანება ორ ამოცანად:

1. მოცემული წარმადობის ტუმბოებით რამდენ ხანში ამოიტუმბება დანადგარი დასახულ წნევამდე;

2. მოცემული ამოტუმბვის დროის, წნევისა და კამერის მოცულობის პირობებში, რომლებიც აუცილებელია, რამდენიმე მეტალურგიული პროცესის განსახორციელებლად, განისაზღვროს ამოტუმბვის სიჩქარე და შეირჩეს შესაბამისი ტუმბოები.

ყველა ანგარიშისას თვლიან, რომ აირის რაოდენობა, რომელიც გაივლის ამოტუმბული სისტემის ნებისმიერ კვეთში დროის ერთეულში, წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს. მილგაყვანილობის გამტარიანობა C არის აირის Q რაოდენობა, რომელიც გადის მოცემულ მილგაყვანილობაში დროის ერთეულში მის ბოლოებზე არსებული წნევათა სხვაობისას.

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2} \text{ ლ/წმ,}$$

სადაც P_1 - წნევა მილგაყვანილობის შესასვლელში,

P_2 - წნევა მილგაყვანილობის გამოსასვლელში.

ამოტუმბვის სიჩქარე S არის ერთეულ წნევასთან იმ აირის მოცულობის შეფარდება, რომელიც გადის მილგაყვანილობის კვეთში დროის ერთეულში

$$S = \frac{Q}{P} \text{ ლ/წმ.}$$

V მოცულობის დანადგარში P_1 წნევის ამოტუმბვის დრო P_2 წნევამდე, თუ ზღვრული ნარჩენი წნევა P_0 -ია, შემდეგნაირად არის დაკავშირებული ამოტუმბვის სისწრაფესთან.

$$t = 2,3 \frac{V}{S_{\text{შ.}}} \lg \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0}$$

7.1.2. მეტალურგიული დანადგარების ვაკუუმური სისტემების გაანგარიშების მეთოდი

სანამ დაეიწყებდეთ ვაკუუმური სისტემების გაანგარიშებებს, საჭიროა დავადგინოთ აირის ის რაოდენობა, რომელიც უნდა გამოიყოფოს დნობის დროს და რომლის ამოტუმბვაცაა საჭირო. შემდეგ უნდა დავადგინოთ ის დრო, რომლის განმავლობაშიც ატმოსფერული წნევა დაიყვანება სამუშაო წნევამდე. ეს დრო, რასაკვირველია, უნდა იყოს ეკონომიკურად გამართლებული. გაანგარიშებები მიმდინარეობს ამოტუმბვის იმ უმაღლესი სიჩქარის მიხედვით, რომლის დროსაც ატმოსფერული წნევა დავა სამუშაო წნევამდე ანდა ამოტუმბვის იმ სიჩქარის მიხედვით, რომელიც საჭიროა სამუშაო წნევის შესანარჩუნებლად. რომელიმე ტექნოლოგიური პროცესის ჩასატარებლად, ანგარიში შემდეგი მიმდევრობით შეიძლება ჩაატაროთ:

1. კონსტრუქციული მოსაზრებებიდან გამომდინარე და პრაქტიკულ მონაცემებზე დაფუძნებით, ვირჩევთ სქემას და შეერთებების ზომებს ტუმბოებსა და კამერას შორის. გამოვიანგარიშებთ სისტემის გამტარიანობას;
2. გამოვთვლით ტუმბოს საჭირო ამოტუმბვის სიჩქარეს $S_{\text{არ}}$;
3. ამოტუმბვის სიჩქარის მიხედვით კატალოგებით შევარჩევთ ტუმბოს, ხოლო ტუმბოს შემწევები მილკედლის მიხედვით მიღგაყვანილობის დიამეტრს, რომელიც არ უნდა იყოს შემწევები მილკედლის დიამეტრზე მეტი.
4. ამოვარჩევთ დამხმარე ტუმბოს. მაგალითად, ორთქლ-ჭაველიანი დიფუზიური ტუმბოსათვის – ფორვაკუუმურ ტუმბოს;

7.1.3. გამოყოფილი აირების რაოდენობის განსაზღვრა

ვაკუუმური დნობის დროს გახურების პროცესში გამოყოფილი ამოსატუმბი აირების წარმოშობის წყაროები შეიძლება იყოს: ა) თხევადი ლითონი, ბ) დესორბცია დანადგარის კედლებიდან, გ) დესორბცია ცეცხლგამძლე და საინჟინერიო მასალებიდან, დ) ატმოსფერული ჰაერის შეპარვა დანადგარში.

7.1.4. აირის გამოყოფა თხევადი ლითონიდან

მაგალითისათვის განვიხილოთ აირის გამოყოფა ლითონური ჯართიდან ვაკუუმურ-ინდუქციური დნობის პროცესში. ზეარო ლითონის

გადადნობისას ინდუქციურ ვაკუუმურ ღუმელში ჟანგბადის უდიდესი ნაწილი გამოიყოფა ლითონის გადნობისას ნახშირჟანგის სახით.

აზოტი გამოიყოფა მთელი დნობის დროს. წყალბადი კი, ძირითადად, — თხევადი ლითონიდან მისი ვაკუუმირების პირველ პერიოდში. რადგან, ჯერჯერობით არ არის სრულყოფილად შესწავლილი აირების გამოყოფის კინეტიკა ლითონის ვაკუუმში დნობისას, შეიძლება დაეუშვათ, რომ გადნობის პერიოდში გამოიყოფა მთელი ჟანგბადის 70 %, 20–40 % აზოტის და 20–40 % წყალბადის. აუცილებელია გავითვალისწინოთ ის გარემოება, რომ წყალბადი გამოიყოფა მყარი ლითონიდანაც მისი გახურების დროს. თხევადი ლითონის დაყოვნებისას რაფინირების (დახალასების) პირველ პერიოდში გამოიყოფა 50 % წყალბადი, 40 % აზოტი და 15 % ჟანგბადი. რასაკვირველია ეს მონაცემები მიახლოებითია და დამოკიდებულია როგორც დნობის ტექნოლოგიურ პროცესზე, ასევე იმაზე დნობა მიდის ლითონურ ნარჩენებით თუ — ახალ კაზმზე.

ვაკუუმური სისტემის ანგარიშისას ყურადღება უნდა მივაქციოთ იმ გარემოებას, რომ დნობა იყოფა ორ ნაწილად: ა) კაზმის გადნობა, როდესაც გამოიყოფა აირების უდიდესი ნაწილი, ღუმელში მაღალი წნევისას და ბ) რაფინირების პერიოდი, როდესაც მთელი ლითონი გამდნარია, აირების გამოყოფა საგრძნობლად მცირდება. ამ პერიოდში წნევა უნდა იყოს საკმარისად დაბალი.

ამასთან დაკავშირებით, გადნობის პერიოდში შეუძლია იმუშაოს დაბალვაკუუმშიანმა ტუმბოებმა, ხოლო გადნობის შემდეგ — მაღალვაკუუმშიანებმა.

გადნობის პერიოდი დამოკიდებულია ღუმელის ტეკადობაზე. ტრანსფორმატორის სიმძლავრესა და სიხშირეზე.

დნობის პერიოდში გამოყოფილი აირების რაოდენობის გამოსათვლელად ადგენენ ბალანსს.

როდესაც დნობა წარმოებს რკალურ ან ელექტრონულ-სხივურ ვაკუუმურ ღუმელებში, მხედველობაშია მისაღები ის გარემოება, რომ ერთდროულად გვაქვს როგორც გამდნარი, ასევე მყარი ლითონიც. ამ შემთხვევაში გამოყოფილი აირების რაოდენობის გამოანგარიშება უნდა მოხდეს დროის ერთეულში გადნობილი ლითონიდან გამოყოფილი აირების რაოდენობიდან, ლითონის მთელ მოცულობაზე გადაყვანით (გადათვლით).

7.15. ლითონკონსტრუქციების ზედაპირიდან დესორბირებული აირების რაოდენობა

ცნობილია, რომ ლითონის ზედაპირი ყოველთვის დაფარულია ადსორბირებული აირის მოლეკულებით. ვაკუუმში ხდება მისი დესორბაცია. საქმეს ართულებს ის გარემოებაც, რომ ლითონის ზედაპირის მიკროფართობი ყოველთვის მეტია მის გეომეტრიულ ფართობზე, რადგან მიკროფართობში იგულისხმება ლითონის ზედაპირის უსწორმასწორობა. რაც მეტია უსწორმასწორობა, მით მეტი აირი ადსორბირდება ლითონის ზედაპირზე და, მაშასადამე, მის დესორბირებასაც მეტი დრო დასჭირდება. ამიტომ ლითონკონსტრუქციების ის ზედაპირები, რომლებიც ვაკუუმში მუშაობენ, რაც შეიძლება მაღალი სიზუსტით უნდა იქნეს დამუშავებული. გარდა ამისა, ლითონკონსტრუქციების ზედაპირი თუ დაუზანგულია, იზრდება ადსორბირებული აირების რაოდენობა. ამიტომ ის ადგილები, რომლებიც დულდება ან ირჩილება, წინასწარ უნდა დამუშავდეს და გაიწმინდოს. აირების დესორბაციას საგრძნობლად აჩქარებს ლითონის ზედაპირის გახურება.

განვიხილოთ რკალური ვაკუუმური ღუმელის ზედაპირიდან აირების მოცილების მაგალითი. ღუმელის ზომებია (მმ):

	დიამეტრი	სიგრძე
კრისტალიზატორი	560	4500
ელექტროდი	450	6500
ღუმელის კამერა	1500	2270
ელექტროდის დამჭერი	150	300
ვაკუუმგაყვანილობა	900	3000

აქვე მოვიყვანოთ ღუმელის ნაწილების ზედაპირის ფართობები, მ²

კამერა:	
ზედა სახურავი	1,77
ქვედი	1,52
კედლები	10,06
სულ	13,35
ვაკუუმგაყვანილობა	8,5
კრისტალიზატორი	8,1
ელექტროდი	9,5
ელექტროდის დამჭერი	0,1

ღუმელის კამერა, ვაკუუმგაყვანილობა და ელექტროდის დამჭერები მზადდება უჟანგავი ფოლადისაგან.

ელექტროდი, თუ ხდება უჟანგავე ფოლადის გადადნობა, მზადდება ასევე უჟანგავე ფოლადისაგან. მაგრამ მისი ზედაპირის დამუშავება 3-ჯერ უარესია ლუმელის კედლებისაზე. ამრიგად, ლითონური ნაწილების ზედაპირის ფართობების ჯამი შეადგენს

$$F = F_{\text{კა}} + F_{\text{კათ}} + 3F_{\text{კა}} + F_{\text{კათ}} = 51 \text{ მ}^2.$$

დუდილის სამუშაო წნევაა $5 \cdot 10^{-4}$ მმ Hg ლითონური ნაწილებიდან აირების მოშორების სიჩქარე

$$S = \frac{0.24 \cdot 51}{6.65 \cdot 10^{-2}} = 184 \text{ ლ/წმ.}$$

სპილენძის ნაწილებიდან კი

$$S = \frac{6.1 \cdot 10^{-2} \cdot 8.15}{6.65 \cdot 10^{-2}} = 7.5 \text{ ლ/წმ.}$$

აირების გამოყოფის საერთო სიჩქარე იქნება ~ 190 ლ/წმ. $5 \cdot 10^{-4}$ მმ Hg წნევის დროს.

7.1.6. ცეცხლგამძლე მასალებიდან გამოყოფილი აირები

ცეცხლგამძლე მასალებიდან აირების გამოყოფის შესახებ ცნობები ძალიან მცირეა. გამოყოფილი აირების რაოდენობა დამოკიდებულია: ცეცხლგამძლე მასალის სახეობაზე; მომზადების ხარისხზე ე.ი. ნედლე მდგომარეობაში იხმარება თუ გამომშრალია; გამომწვარია თუ არა დნობის შემდეგ და ა.შ. დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე იმას, თუ რამდენ ხანს იმყოფება ლუმელი ჰაერზე გახსნილ მდგომარეობაში. რაც უფრო მეტი ხანია ღია ე.ი., რაც უფრო მეტი ხანი ეხება ლუმელის ცეცხლგამძლე ამონაგი ჰაერს. მით მეტ ჰაირებს ადსორბირებს იგი. დადგენილია, რომ მსუბუქი შამოტი ჰაერზე 6 საათის განმავლობაში ადსორბირებს 4 სმ³/დმ³ აირს, ხოლო 300-400 საათის განმავლობაში - 17-20 სმ³/დმ³. ცეცხლგამძლე მასალებიდან გამოყოფილი აირების რაოდენობის გასარკვევად აუცილებელია ვიცოდეთ ამონაგის აირშედწევადობის სიდიდე ან კუთრი გამტარობა. კუთრ გამტარობად იღებენ აირის იმ რაოდენობას, რომელიც გადის 1 სმ³ ზედაპირის მქონე 1 სმ სისქის ფენაში 1 წამის განმავლობაში, წნევათა 10-3 მმ Hg სხვაობის დროს. რასაკვირველია, კუთრი გამტარობა იზომება ნორმალურ პირობებში. ამონაგის დეგაზაციისათვის საჭირო დრო გამოითვლება ფორმულით

$$\tau = \frac{q\delta^2}{\nu \Delta P},$$

სადაც δ – ამონაგის სისქე, სმ;
 q – აირგამოყოფა, სმ³/დმ²;
 ν – აირგამტარობა;
 ΔP – წნევათა სხვაობა, მმ Hg.

7.1.7. არასიმჭიდროვეებიდან შეღწეული აირების რაოდენობა

გამოითვლება ფორმულით

$$E = \frac{\Delta P \cdot V}{\tau},$$

სადაც ΔP – τ დროის განმავლობაში წნევის ცვლილება, ლ.ნ/მ²წმ.
 V – ღუმელის მოცულობა, ლ.

იმისათვის, რომ დაეადგინოთ შეღწეული აირების ჭეშმარიტი რაოდენობა, საჭიროა ღუმელის ამოტუმბვა დიდი ხნის განმავლობაში. ამას იმიტომ აკეთებენ, რომ გამორიცხონ კედლებიდან დესორბირებული აირების არსებობა ღუმელში. ხოლო შეღწეული აირების დასაშვები რაოდენობა უნდა განვიხილოთ გამოსაჯნობი ლითონის აირშემცველობასთან დაკავშირებით. ეს ნიშნავს, რომ თუ საჭიროა მივიღოთ ლითონი აირების უმცირესი შემცველობით, აირის შეღწევადობაც უნდა იყოს ძალიან მცირე.

7.1.8. აუცილებლად ამოსატუმბი აირების რაოდენობის გამოთვლა

ამრიგად, აირების საერთო რაოდენობა, რომელიც საჭიროა ამოიტუმბოს, გამოითვლება ფორმულით

$$Q = \frac{10qG}{\tau} n + \frac{q_a V}{\tau} + q_{\text{აირ}} F + q_{\text{გელ}}.$$

სადაც q – ამონაგიდან გამოყოფილი აირის რაოდენობა, ლ.ნ/კგ.
 G – ჩანატვირთის წონა, კგ. n – აირგამყოფის უთანაბრობის კოეფიციენტი, τ – ციკლის ხანგრძლივობა, წმ, q_a – ამონაგის ერთეული მოცულობიდან გამოყოფილი აირების რაოდენობა, ლ.ნ/დმ³; V – ამონაგის მოცულობა, დმ³; $q_{\text{აირ}}$ – ღუმელის ლითონური ნაწილების

ზედაპირიდან აირების გამოყოფა ლ.ნ/მ² წამ. F – ლუმენის შიდა ნაწილების ფართობი; $q_{\text{აღ}}$ – შეღწევადობა ლ.ნ/მ² წამ.

აირების ამოტუმბვის საჭირო სინქარე გამოითვლება ფორმულით

$$S_{\text{აღ}} = Q/P \text{ ლ/წმ.}$$

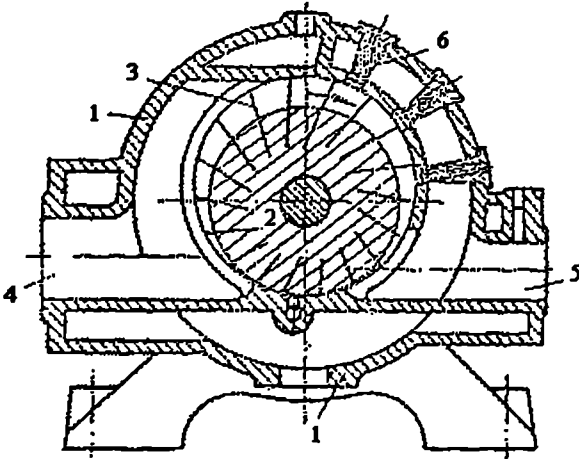
თ ა ვ ი II

ვაკუუმური ტუმბოები

ზემოთ უკვე აღვნიშნეთ, რომ ვაკუუმში პირობითადაა დაყოფილი სამ ზონად: დაბალ, საშუალო და მაღალ ვაკუუმად. ბუნებრივია, რომ თუ შეიძლება სამივე სახის ვაკუუმის მიღება, საჭიროა გვექონდეს შესაბამისი ტუმბოებიც. მართლაც არსებობს მრავალი სახის ტუმბო, რომელთაგან ზოგის დანიშნულებაა შექმნას დაბალი ვაკუუმი, ზოგის – საშუალო და ზოგისაც – მაღალი. თუ დაბალი ვაკუუმის მიღება, ჩვენ პირობებში. უკვე ძნელი არ არის და მარტივ მექანიკურ ტუმბოებსაც შეუძლიათ შექმნან დაბალი გაიშვიათება, სულ სხვაა მაღალი ვაკუუმის მიღება. ისეთი გაიშვიათების შექმნა, როგორცაა 10^3 მმ Hg და უფრო დაბალი, მარტო ერთი სახის ტუმბოთი, და მით უმეტეს, მექანიკურით, ვერ ხერხდება, საჭიროა რამდენიმე ტუმბო. ერთი ტუმბო თუ ატმოსფერული წნევიდან შექმნის გაიშვიათებას 1 მმ–0,1 მმ Hg-ს, შემდგომმა, უფრო მეტი შესაძლებლობის ტუმბომ, უნდა დაიყვანოს ეს წნევა უფრო დაბალ დონემდე. ძალიან მაღალი გაიშვიათების (10^4 – 10^{12} მმ Hg) მისაღებად კი იხმარება უკვე სპეციალური ტუმბოების გაერთიანება. განვიხილოთ ტუმბოების ცალკეული ტიპი.

7.2.1. მრავალფირფიტის ტუმბოები

როტორის ბრუნვისას, ცენტრიდანული ძალების მოქმედებით, ფირფიტები გამოდის თავისი კილოებიდან და სრიალებს კორპუსის შიდა სიბრტყეზე. ორ ფირფიტასა და კორპუსს შორის მოთავსებული მოცულობა მცირდება როტორის შემობრუნებისას (სურ. 7.1). ამიტომ შემავალი აირები, რომლებიც ამ მოცულობაში მოხვდება. თანდათან იკუმშება და გამოსასვლელ მილაკთან მაღალი წნევით მიაღწევს. მაღალი წნევის გამო, ისინი გამოიღვენება გამოშვალ



სურ. 7.1. მრავალფირფიტიანი ტუმბოს სქემა:

1. კორპუსი; 2. როტორი; 3. ფირფიტები; 4. შემაჯავლი მილი; 5. გამოშავალი მილი; 6. ზეთის მოწოდება

მილაკში. ასეთი ტუმბოები გამოიყენება დაბალი ვაკუუმის ანუ გაიშვიათების მისაღებად. მათი ზღვრული გაიშვიათება არ ეცემა 15–25 მმ Hg ქვევით. თუ ასეთ ტუმბოებს მივაერთებთ მიმდევრობით, მაშინ გაიშვიათება შეიძლება. გახდეს 4 მმ Hg. საერთოდ, თუ ორი ტუმბო პარალელურადაა შეერთებული, მაშინ იზრდება ამოტუმბვის სიჩქარე. ხოლო, თუ მათ შევაერთებთ მიმდევრობით, მაშინ უფრო დაბალ გაიშვიათებას მივაღწევთ. რასაკვირველია ტუმბოს მუშაობისათვის აუცილებელია, რომ კორპუსის შიდა კედელი, რომელზეც სრიალებს ფირფიტები, უნდა იზეთებოდეს.

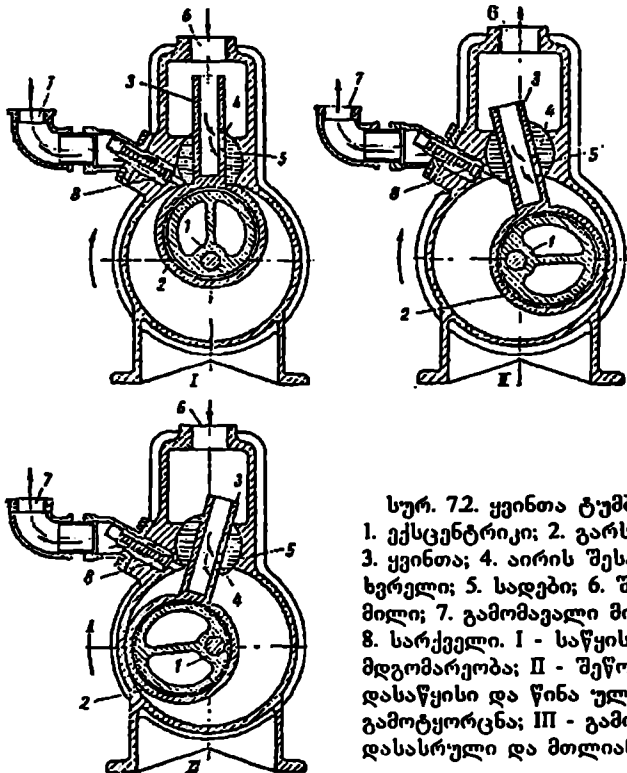
7.2.2. ფირფიტა-როტორული ტუმბოები

ამ ტიპის ტუმბოების კორპუსში ტრიალებს როტორი, რომლის კილოებშიც მოთავსებულია ორი ფირფიტა. ისინი ზამბარის მოქმედებით გაიწევა. როტორი ტუმბოს კორპუსში მოთავსებულია ექსცენტრულად. ბრუნვის დროს დგუში ყოველთვის მოდის შეხებაში კორპუსის ზედა ნაწილთან. დგუშის ბრუნვისას ფირფიტები ერთ მხარეს ქმნიან დიდ მოცულობას, მეორე მხარეს – კუმშავენ. პრინციპი ამ ტუმბოსი ისეთივეა, როგორიც ფირფიტებიანი ტუმბოსი. ხოლო მისგან განსხვავებით ტუმბოს კორპუსი მოთავსებულია ზეთში, რომელიც ამავე დროს, მამჭიდროებელ სითხეს წარმოადგენს. ტუმბოს გაიშვიათების ზღერის მისაღწევად მას აკეთებენ

ორსაფეხურიანს. ე.ი. აქეთ ორი კამერა, რომელთა მიმდევრობითი შეერთება გვაძლევს უფრო მეტ გაიშვიათებას.

7.2.3. ყვინთა ტუმბოები

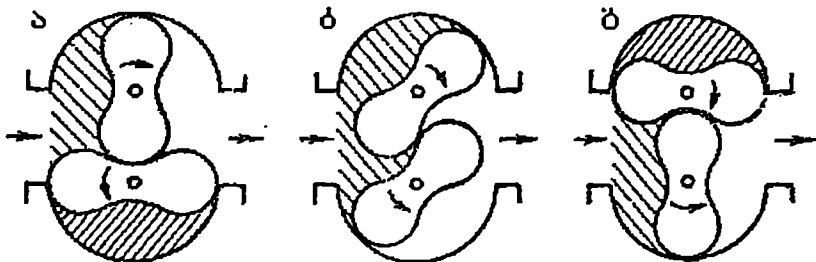
ამ ტუმბოს დგუშში მოძრაობს ექსცენტრიკი, რომელსაც გარედან შემორტყმული აქვს გარსაკრი (სურ. 72). გარსაკრის ზედა ნაწილი წარმოადგენს ზევიდან გახსნილ პარალელოპიპედს. რომელიც მოძრაობს მკვეთარაში და გვერდზე აქვს ნახევრეტი. ექსცენტრიკის ბრუნვის დროს დგუშში – გარსაკრი, რომელიც მჭიდროდ ეხება კამერის კედელს, ასრულებს მერხვე მოძრაობას ერთი მხრიდან მეორისაკენ. ამავე დროს, ის სრიალებს მკვეთარაში ზევიდან ქვევით და პირიქით. გარსაკრი თითქოს მისრიალებს კამერის კედელზე. ტუმბო ასრულებს ორმაგ მუშაობას: იწოვს ა.წს და გამოუშვებს გამოსაშვებ მილაკიდან:



სურ. 72. ყვინთა ტუმბოს სქემა.
 1. ექსცენტრიკი; 2. გარსაკრი;
 3. ყვინთა; 4. აირის შესაყვანი ხერხელი; 5. სადები; 6. შემავეალი მილი; 7. გამომავალი მილი; 8. სარქველი. I - საწყისი მდგომარეობა; II - შეწოვის დასაწყისი და წინა ულუფის გამოტყორცნა; III - გამოტყორცნის დასასრული და მთლიანი შეწოვა

7.2.4. ორროტორიანი ტუმბოები

ორი როტორი, რომელთაც რვიანის ფორმა აქვთ, სინქრონულად მოძრაობენ ტუმბოს კორპუსში, ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ. კორიზონტალურ მდგომარეობაში როტორების ფრთები შეიძლება ერთმანეთის მიმართ გაღუნული იყოს პროპელერის მსგავსად. ბრუნვის დროს როტორები არ ეხება ერთმანეთს და კორპუსის კედლებს.



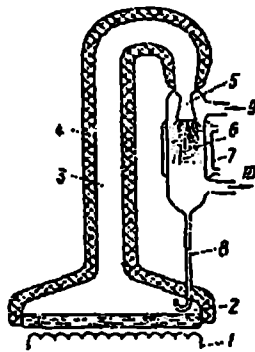
სურ. 7.3. ორროტორიანი ტუმბოს მოქმედების პრინციპი.

ა, ბ, გ - შეწოვის და გამოტყორცნის მიმდევრობითი საფეხურები

ამის მიღწევა შეიძლება მხოლოდ ფრთების ძალიან ზუსტი დამუშავებითა და ფრთებსა და კორპუსის კედლებს შორის დარჩენილი ღრეჩოს უზუსტესი დარეგულირებით. (0,075–0,37 მმ). რადგან როტორები ერთმანეთს არ ეხება, შესაძლებელია დიდი სიჩქარით იბრუნოს ~3000 ბრ/წთ. ორროტორიანი დგუშების მუშაობისას საწყისი წნევა არ უნდა იყოს დიდი. ოპტიმალური მნიშვნელობაა 1-0,01 მმ Hg. გაიშვიათების ზღვრული მნიშვნელობა დამოკიდებულია საწყის წნევაზე და შესაძლებელია მივიღოთ 0,005–0,0001 მმ Hg. ორსაფეხურიანი ტუმბოების გამოყენებით კი - 10^6 მმ Hg, მაგრამ ამ ტუმბოების უარყოფითი მხარე არის ის, რომ მათ მიერ შექმნილი გაიშვიათება დამოკიდებულია საწყის წნევაზე. მათ შეუძლიათ წნევის დაწევა 10–50-ჯერ. ე.ი. თუ ორსაფეხურიანი ტუმბო მუშაობს ფორვაკუუმურ ტუმბოსთან ერთად, რომელიც იძლევა გაიშვიათებას 0,02–0,01 მმ Hg, მაშინ ორროტორიანი ტუმბოები მოგვცემს მარტო 0,005–0,001 მმ Hg.

7.2.5. ორთქლჭაველური ტუმბოები

იმისდა მიხედვით, თუ როგორ გამოდის ორთქლის ნაკადი, ამ ტიპის ტუმბოები იყოფა: ეექტორულ, ბუსტერულ და მაღალ-



სურ. 7.4. ორთქლჭაველური ტუმბოს სქემა

1. გამახურებელი; 2. სადულარა; 3. ორთქლის გამტარებელი; 4. კორპუსი;
5. საქშენი; 6. ორთქლის ჭაველი; 7. წყლით გამაცივებელი; 8. ზეთის გადმოსასხამი; 9. შემავალი მილი; 10. გამომავალი მილი

ვაკუუმურად. შესაბამისად მათ შეუძლიათ მოგვცენ 10^{-2} , 10^{-4} და 10^{-7} მმ Hg გაიშვიათება. რადგან ყველა ტუმბო მუშაობს ერთი პრინციპით, ამიტომ გავეცნოთ მარტო ორთქლჭაველური ტუმბოების (სურ. 7.4) მუშაობის პრინციპს. ჩამოთვლილი ტუმბოები კი მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისაგან.

ტუმბოს ქვედზე ისხმება ვაკუუმური ზეთი (ზოგ შემთხვევაში ვერცხლისწყალი). ხურდება მახურებლებით და ზეთი იწყებს ორთქლებას. ორთქლი, მიემართება რა საქშენისაკენ, მოძრაობს დიდი სისწრაფით და საქშენიდან გამოსვლისას თან წარიტაცებს აირის მოლეკულებსაც. შემდეგ ზეთის ორთქლი ხედება მაცივარში, კონდენსირდება და ისევ ბრუნდება ტუმბოში.

თ ა ვ ი III

ვაკუუმური მეტალურგიის პროცესების ფიზიკურ-ქიმიური საფუძვლები

ვაკუუმში მყოფ თხევად ლითონში მიმდინარე პროცესები ერთმანეთზეა დამოკიდებული და უმეტეს შემთხვევაში ერთდროულად მიმდინარეობს. მაგალითად, ლითონის ნახშირბადით განუანგვისას, რომელსაც თან სდევს ნახშირჟანგისა და ნახშირორჟანგის გამოყოფა ბუშტების სახით, ხდება წყალბადის და

აზოტის გამოყოფა, არალითონური ჩანარების ამოტივტივება და აღდგენა, ადვილდნობადი მინარევი კომპონენტების აორთქლება და სხვა. იმისათვის, რომ უფრო კარგად წარმოვიდგინოთ სხვადასხვა ვაკუუმური დანადგარის შესაძლებლობანი, საჭიროა ჯერ გავეცნოთ იმ რეაქციებსა და პროცესებს, რომლებიც ლითონთა ვაკუუმში დნობის დროს მიმდინარეობენ.

7.3.1. ლითონის დახალასება (რაფინირება) ჯანგბადისაგან

ვაკუუმის ქვეშ მყოფი ლითონიდან ჯანგბადის მოშორება ხდება სხვადასხვა ხერხით: 1. ლითონის განჯანგვით ნახშირბადით, წყალბადით, ლითონური განმჯანგველებით; 2. არალითონური და ჯანგული ჩანარების ამოტივტივებით; 3. აქროლადი ჯანგეულების აორთქლებით; 4. პირდაპირ მისი გამოყოფით აიროვან ფაზაში.

7.3.1.1. ლითონის განჯანგვა ნახშირბადით

დაბალი წნევის ქვეშ მყოფ თხევად ლითონში მიმდინარე ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი რეაქციაა ნახშირბადის ურთიერთქმედება ლითონში გახსნილ ან ჯანგეულების სახით მყოფ ჯანგბადთან. მათი ურთიერთქმედებისას წარმოიქმნება ნახშირჯანგი და ნახშირორჯანგი. ვაკუუმში ეს რეაქცია გაცილებით უფრო სრულად მიმდინარეობს, ვიდრე ატმოსფერული წნევის დროს. CO და CO₂-ის ბუშტების გამოყოფით ხდება არა მარტო ლითონის განჯანგვა, არამედ იქმნება ხელსაყრელი პირობები აზოტის და წყალბადის მოსაშორებლად და არალითონური ჩანარების ამოსატივტივებლად. განჯანგვის რეაქცია საერთო სახით შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად $[C]+x[O]=\{CO_x\}$, სადაც x გულისხმობს როგორც CO, ისე CO₂ წარმოქმნას. იმისდა მიხედვით, თუ რამდენი CO₂ წარმოიქმნება x შეიძლება იყოს 1-ის ტოლი ან მეტი. საერთოდ, x იანგარიშება CO და CO₂ აირების პარციალური წნევის შეფარდებით ნახშირბადის აღებული აქტიურობის დროს. ისე კი, მრავალი ცდითაა დამტკიცებული, რომ წარმოქმნილი CO₂-ის რაოდენობა ძალიან მცირეა და x შეიძლება ავიღოთ 1-ის ტოლი x=1. ე.ი. ვიგულისხმოთ, რომ ეს პროცესი მიმდინარეობს მარტო CO-ს წარმოქმნით.

ჯიბსის ფაზათა წესით სისტემას „ლითონი – აირი“ შეიძლება ჰქონდეს თავისუფლების ორი ხარისხი და მოცემული ტემპერატურ-

რის დროს წონასწორობა განისაზღვროს P_{CO} წნევით აირის ფაზაში. რეაქციის წონასწორობის მუდმივა ტოლია

$$K = \frac{P_{CO}}{a_C \cdot a_O},$$

სადაც a_C და a_O – ლითონში ნახშირბადის და ჟანგბადის აქტიურობებია.

ლითონში ჟანგბადის აქტიურობა დამოკიდებულია თხევადი ლითონის ზევით აიროვან ფაზაში მყოფი CO-ს წონასწორობულ წნევაზე:

$$a_{[O]} = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_{CO}}{a_C} = K' P_{CO},$$

$$\text{სადაც } K' = \frac{1}{K \cdot a_C}.$$

თუ დაეუჯერებთ მოქმედ მასათა კანონს, მაშინ გამოდის, რომ ლითონის განჟანგვა ნახშირბადით დამოკიდებული ყოფილა მარტოოდენ თხევადი ლითონის ზევით აიროვან ფაზაში მყოფი CO-ს პარციალურ წნევაზე. ანუ რაც მცირეა წნევა, მით მეტია ნახშირბადის განჟანგვის უნარი და მით ნაკლები ჟანგბადის შემცველობა უნდა დარჩეს ლითონში ნახშირბადის მოცემულ კონცენტრაციასთან წონასწორობისას. თერმოდინამიკური გამოთვლებით გამოდის, რომ 1600 °C ტემპერატურაზე 1 მმ Hg წნევისა და 0,1 % C-ის შემცველობისას, ლითონში ჟანგბადის რაოდენობა არ უნდა აღემატებოდეს $3 \cdot 10^{-5}$ %-ს. მაგრამ ჟანგბადის ასეთ მცირე შემცველობას ვერ დებულბენ ვაკუუმური მეტალურგიის ვერც ერთი პროცესით. პირიქით, ვაკუუმში გამოდნობილი ლითონი შეიცავს გაცილებით მეტ ჟანგბადს, ვიდრე მასთან ნახშირბადის წონასწორობულ რაოდენობას შეესაბამება. გამოირკვა, რომ ნახშირბადის განჟანგვის უნარი აღარ არის დამოკიდებული თხევადი ლითონის ზევით აიროვან ფაზაში მყოფი CO-ს წნევაზე, თუ იგი გარკვეულ მნიშვნელობაზე უფრო დაბალია.

ასეთი განსხვავება თერმოდინამიკურ გამოთვლებსა და ცდებს შორის აიხსნება თხევადი ლითონიდან CO-ს გამოყოფის პროცესის კინეტიკის თავისებურებიდან. ადვილად წარმოსადგენია, რომ წნევა აირის ბუშტში, რომელიც წარმოიქმნება ლითონში, გაცილებით მეტია, ვიდრე CO-ს წნევა ლითონის ზევით მყოფ აიროვან ფაზაში. ამიტომ ჟანგბადის შემცველობა ლითონში უნდა განისაზღვროს CO-ს წნევით ბუშტში და თერმოდინამიკური გამოთვლების დროს

უნდა ვისარგებლოთ არა აიროვან ფაზაში CO-ს წნევით, არამედ – მისი წნევით ბუშტში, სადაც ხდება CO-ს გამოყოფა ლითონის მოცულობიდან.

ლითონური აბაზანის სიღრმეში P_{CO} -ს სიდიდე CO-ს წარმოქმნის ადგილას უნდა იყოს ტოლი ლითონის ზედაპირზე ატმოსფერული წნევის, თხევადი ლითონის სვეტის ფეროსტატიკური წნევისა და ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გადასალახავედ საჭირო წნევის ჯამისა

$$P_{CO} = P_s + \gamma h + \frac{2\sigma}{r},$$

სადაც P_s – ატმოსფერული წნევა;

γ – ლითონის სიმკვრივე;

h – წარმოქმნილ ბუშტზე მყოფი თხევადი ლითონის სვეტის სიმაღლე;

σ – ლითონის ზედაპირული დაჭიმულობა;

r – ბუშტის რადიუსი.

როგორც მრავალი ცდით გამოირკვა, ბუშტის წარმოქმნის შესაძლებლობა უფრო მეტია ტიგელის კედლებზე, ქვედზე, არალითონურ ჩანართებსა თუ კრისტალიზაციის დროს წარმოშობილ კრისტალებზე, ვიდრე ლითონის მოცულობაში (ამის ერთ-ერთი დამამტკიცებელი ფაქტია ლითონის დნობა ტიგელში და შეტივტივებულ მდგომარეობაში. პირველ შემთხვევაში გამოიყოფა რამდენჯერმე უფრო მეტი აირი).

როგორც ცნობილია, არადასველებად ზედაპირზე ადვილდება ბუშტის წარმოქმნა. ცეცხლგამძლე მასალები კი სწორედ არადასველებადი მასალებია. ამიტომ ტიგელის კედლები და ქვედი სწორედ ის ადგილებია, რომლებზედაც შესაძლებელია ბუშტის წარმოქმნა. ბუშტის წარმოქმნა არადასველებად ზედაპირზე ადვილდება იმიტომ, რომ აირის მცირე მოცულობის დროსაც კი ლინზისმაგვარი ბუშტის სიმრუდის რადიუსი დიდია და ამიტომ კაპილარული წნევა ამ შემთხვევაში უფრო ნაკლებია, ვიდრე სფერული ბუშტის წარმოქმნისას. ამიტომაც კრიტიკული ზომის ბუშტის წარმოსაქმნელად საჭიროა გაცილებით ნაკლები CO-ს მოლექკულების რაოდენობა. არადასველებად ზედაპირზე ბუშტის ზრდისას ის თანდათან მატულობს მოცულობაში და როცა მიაღწევს გარკვეულ მოცულობას, ხდება მისი გადაწყვეტა.

ბუშტი წყდება და ამოტივტივდება, ხოლო ფუძე რჩება და მასში იწყებს გადასვლას CO-ს ახალი მოლექკულები.

ბუშტის გაწყვეტა შუაზე ხდება იმიტომ, რომ მთლიანი ბუშტის ზედაპირიდან მოსაწყვეტად საჭირო მუშაობა აღემატება ბუშტის

გადაწყვეტიანათვის საჭირო მუშაობას. სანამ ბუშტი პატარაა, მისი ზედაპირი სფერულია. ბუშტის ზრდასთან ერთად იზრდება ფეროსტატიკური წნევის სხვაობა ბუშტის ზედა და ქვედა ნაწილში. ეს განსხვავება უნდა იყოს გაწონასწორებული ზედაპირული დაჭიმულობის ძალებით. ამიტომ, ბუშტის ზედა ნაწილი იზრდება, ქვედა კი – მცირდება. ეს შემცირება მანამდე გრძელდება, სანამ ბუშტი არ გაწყდება. თუ დაეუკვირდებით ბუშტების წარმოშობის და მოწყვეტის მექანიზმს დაეინახავთ (სურ. 7.5), რომ ტიგელის ქვედა სწორედ ის ადგილია, სადაც შეიძლება მოხდეს ბუშტის ჩასახვა და ზრდა. კედლები კი ნაკლებ მოსახერხებელია, რადგან ბუშტის ზედაპირიდან მოწყვეტის შემთხვევაში, იქ აღარ დარჩება ბუშტის ფუძე. ხოლო, ლინზის მსგავსი ბუშტის თავიდან წარმოქმნა გაცილებით უფრო რთულია, ვიდრე გადაწყვეტილი ბუშტის ფუძეში CO-ს მოლეკულების გადასვლა ლითონის მოცულობიდან.



სურ. 7.5. CO-ს ბუშტის ჩასახვის, ზრდისა და ამოტივტივების დაწყების სქემა

თხევადი ლითონიდან ბუშტის ამოსვლისას მასში გადადის CO, H₂, N₂. ამას ხელს უწყობს ისიც, რომ, რაც უფრო უახლოვდება ბუშტი თხევადი ლითონის ზედაპირს, მით ნაკლებია ფეროსტატიკური წნევა, რის გამოც ბუშტი იზრდება მოცულობაში. ეს თავისთავად იწვევს აირისა და ლითონის აირ-ლითონის რეაქციული ზედაპირის გაზრდას და მასში წნევის შემცირებას.

7.3.12. ლითონის განუანგვა წყალბადით

თერმოდინამიკური მოსაზრებით, წყალბადის გამოყენებამ ვაკუუმის მეტალურგიაში ლითონის განსაუანგად არ უნდა მოგვეცეს არავითარი უპირატესობა. $\{H_2\} + [O] = \{H_2O\}$ განუანგვის რეაქციის წონასწორობის ცვლილებაზე წნევის შემცირება გავლენას არ ახდენს. მაგრამ, ამასთანავე, წყალბადის მეშვეობით შესაძლებელია გაცილებით შევამციროთ უანგბადის რაოდენობა ლითონში. პაერზე დნობასთან შედარებით ვაკუუმში წყალბადის გამოყენებას ის უპირატესობა აქვს, რომ ლითონის წყალბადით გაქრევის შემდეგ, ლითონის ზევით მყოფი წყალბადის წნევის შემცირება, მთლანად გამოყოფს მას ლითონიდან. პაერზე დნობის დროს კი წყალბადი

რჩება ლითონში. განსაკუთრებით ხელსაყრელია წყალბადის გამოყენება იმ შემთხვევებში, როცა საჭიროა დაბალნახშირბადიანი და უნახშირბადო ფოლადების გამოდნობა. სამაგიეროდ დრო, რომელიც საჭიროა წყალბადით განჟანგვისათვის ლითონში ჟანგბადის გარკვეული შემცველობის მისაღწევად, გაცილებით მეტია საჭირო, ვიდრე ნახშირბადით განჟანგვისას.

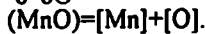
7.3.1.3 განჟანგვა ლითონური განმჟანგველებით

ნახშირბადის ცალკე გამოყენება განმჟანგველად ეერ უზრუნველყოფს ჟანგბადის მცირე შემცველობას დაბალნახშირბადიან ფოლადში. ამავე მიზნით წყალბადის გამოყენება ხშირ შემთხვევაში დაკავშირებულია ბევრ სირთულესა და საშიშროებასთან.

ამის გამო რჩება ლითონური განმჟანგველების გამოყენება ვაკუუმურ მეტალურგიაში მიზანშეწონილად.

ლითონური განმჟანგველებისათვის ვაკუუმში განჟანგვისას ხელსაყრელი პირობები იქმნება. განმჟანგველი არ იჟანგება ჰაერის ჟანგბადითა და წიდით, რის გამოც მთლიანად ასრულებს თავის დანიშნულებას.

Mn, Si, Cr, Al და სხვა ქიმიური ელემენტების განჟანგვის უნარის გამოთვლის თანამიმდევრობა განვიხილოთ მანგანუმის მაგალითზე. განვიხილოთ შემდეგი რეაქცია



ამ რეაქციის წონასწორობის კოეფიციენტი

$$K_{Mn} = a_{Mn} \cdot a_{[O]} = f_{Mn}^{[O]} \cdot f_{[O]}^{Mn} [\%Mn] \cdot [\%O]$$

განისაზღვრება თერმოდინამიკური გაანგარიშებით და ტოლია

$$\lg K_{Mn} = -\frac{25270}{T} + 12,55.$$

ამ შემთხვევაში მანგანუმის აქტიურობის კოეფიციენტი ($f_{Mn}^{[O]}$) მიღებულია 1-ის ტოლად, ხოლო ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტი ($f_{[O]}^{Mn}$) გამოთვლილია ცდების საფუძველზე. კონსტანტის და მანგანუმის შემცველობის ცნობილი მნიშვნელობებიდან გამოითვლება ჟანგბადის წონასწორული შემცველობა. ასევე იანგარიშება წონასწორული მდგომარეობა სხვა ელემენტებისათვისაც.

როგორც გამოირკვა, Mn და Si არ ახდენს გავლენას ფოლადში ჟანგბადის შემცველობაზე, კინეტიკური მრუდების მონოტონური

მსვლელობა არ იცვლება Mn-ის და Si-ის დამატებით. ჟანგბადის მოცილების პროცესი დამოკიდებულია ფოლადში ნახშირბადის შემცველობაზე. Si-სა და Mn-ის განმჟანგავებად გამოყენებისას ლითონში ჟანგბადის ცდისეული ანუ ფაქტიური კონცენტრაცია დაბალნახშირბადიანი ფოლადების შემთხვევაშიც კი გაცილებით ნაკლებია წონასწორულზე. რა შეიძლება დავასკენათ აქედან: განმჟანგველების მიცემის შემდეგ ლითონში ჟანგბადის შემცველობის თეორიული მნიშვნელობა უფრო მეტია, ვიდრე სინამდვილეში არის. ამიტომ ვასკენით, რომ Si და Mn-ით განჟანგვისას ჟანგბადის შემცველობას განსაზღვრავს არა ეს ელემენტები, არამედ ნახშირბადი.

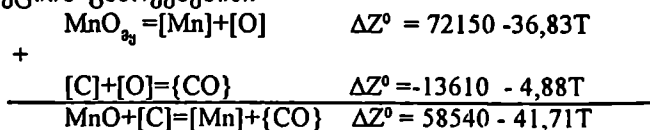
Al-ით განჟანგვისას ჟანგბადის შემცველობა ფოლადში პირველ ხანს მნიშვნელოვნად ეცემა. ქრომიანი ფოლადების განჟანგვისას ლითონში ჟანგბადის ექსპერიმენტებით მიღებული შემცველობა აღემატება თეორიულად გამოთვლილს. ამიტომ Al-ს უფრო მეტი განჟანგვის უნარი გააჩნია ვაკუუმური დნობის დროს, ვიდრე ნახშირბადს. Al-ით განჟანგვის შემდეგ რკინასთან ნახშირბადსა და ქრომის შენადნობებში შესაბამისად რჩება 0,002–0,003 და 0,004–0,005 % C.

7.3.2. არალითონური ჩანართების აღდგენა ვაკუუმში

ვაკუუმურ ღუმელებში გადასადნობ ლითონში ყოველთვის არის სხვადასხვა სახის არალითონური ჩანართების გარკვეული რაოდენობა, რომელთა შედგენილობა დამოკიდებულია წარმოების პირობებსა და განჟანგვის ტექნოლოგიაზე. ლითონიდან ვაკუუმის მეშვეობით არალითონური ჩანართების მოცილება ფოლადიდან ამცირებს მასში ჟანგბადის შემცველობას, აუმჯობესებს ლითონის თვისებებსა და ხარისხს. განვიხილოთ ლითონის გასუფთავება ჩანართებისაგან მათი ნახშირბადით აღდგენის საშუალებით.

7.3.2.1. MnO-ს მინარევების აღდგენა

MnO-ს აღდგენის რეაქცია ნახშირბადით ვიანგარიშით ორი რეაქციის გამოყენებით:



$$\Delta Z_{1600^{\circ}\text{C}}^{\circ} = -19660 \text{ კალ}$$

$$K = P_{\text{Co}} \cdot a_{\text{Mn}} / a_{\text{C}}$$

$$\lg K_{1600^{\circ}\text{C}} = -\Delta Z^{\circ} / 4,575 \cdot 1873 = 19660 / 4,575 \cdot 1873 = 2,29, \text{ რადგან } 1600^{\circ}\text{C} = 1873\text{K}.$$

განვიხილოთ X18H10 მარკის უჟანგავი ფოლადის განჟანგვა, როცა მასში 0,02 და 0,1 % ნახშირბადია და 0,5 და 1,0 % Mn.

ვუშვებთ, რომ $f_{\text{Mn}} = 1$ და $f_{\text{C}} = 1$. ე.ი. Mn-ის აქტიურობა ფოლადში შეიძლება ჩათვალოს 1-ის ტოლად როგორც ძლიერ განზავებული ხსნარების შემთხვევაში, ასევე - ნახშირბადის აქტიურობაც ჟანგბადის მიმართ. ხოლო ნახშირბადის აქტიურობა უჟანგავი ფოლადის ხსნარში გამოითვლება ფორმულით

$$\lg f_{\text{C}}^{\text{Cr}} = e_{\text{C}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}] + e_{\text{C}}^{\text{Ni}} [\% \text{Ni}],$$

აქ e_{C}^{Ni} არის ურთიერთქმედების პარამეტრი. $e_{\text{C}}^{\text{Cr}} = -0,024$, ხოლო $e_{\text{C}}^{\text{Ni}} = 0,012$.

$$\lg f_{\text{C}}^{\text{Cr}} = -0,024 \cdot 18 + 0,012 \cdot 10 = -0,332,$$

$$f_{\text{C}}^{\text{Cr}} = 0,47. \text{ მაშინ } \lg K = \lg \frac{P_{\text{Co}} [\% \text{Mn}]}{0,47 [\% \text{C}]}$$

P_{Co} -ს წონასწორული მნიშვნელობების გამოანგარიშება გვაძლევს

Mn, %	0,5	0,5	1,0	1,0
C, %	0,02	0,1	0,02	0,1
P_{Co} , ატმ	3,66	18,2	1,82	9,1

თუ Mn-ის და C-ის წონასწორულ პირობებში P_{Co} იქნება ისეთი მცირე, რომ ვერ შესძლებს ლითონიდან ამოტივტივებას, ე.ი. ვერ მოაშორებს ჟანგბადს ლითონს, მაშინ განჟანგვა მოხდება Mn-ით.

ცნობილია, რომ ლითონში 1000 მმ-ის სიღრმეზე $P_{\text{Co}} = 1,82$ ატმ ბუშტის უმცირესი რადიუსის ($r_{\text{ბუშტ}} = 2,7 \cdot 10^3$ სმ) დროსაც კი. მიღებული ცხრილიდან კი სჩანს, რომ P_{Co} გაცილებით მეტია იმ მინიმალურ წნევაზე ბუშტში, როდესაც ეს უკანასკნელი იწყებს ამოტივტივებას. ამით ის დასკვნა შეიძლება გაკეთდეს, რომ ვაკუუმური დნობისას ნახშირბადის შემცველ ფოლადს მანგანუმი ვერ აცილებს ჟანგბადს ანუ არ ხდება Mn-ით ლითონის განჟანგვა.

7.3.2. კაუმიწის (SiO₂) ჩანართების აღდგენა

ზუსტად ასევე გამოვთვალოთ შესაძლებელია თუ არა ვაკუუმური დნობისას Si-ით ჟანგბადის მოშორება ფოლადიდან მასში ნახშირბადის ყოფნისას.



+



განვიხილოთ იგივე X18H10 მარკის ფოლადის განჟანგვის შესაძლებლობა Si-ით, როცა Si-ის და O-ს შემცველობები ფოლადში შესაბამისად ტოლია 0,5 და 1,0 % და 0,02 და 0,1 %.

$$K = P_{\text{CO}}^2 \cdot a_{\text{Si}} / a_{\text{C}}^2; \quad \lg K_{1600^\circ\text{C}} = 0,77$$

$$a_{\text{C}}^2 = f_{\text{C}}^{\text{Cr}^2} \cdot [\% \text{C}]^2, \quad \text{ვთვლით, რომ } f_{\text{C}}^{\text{Cr}} = 0,47$$

$$a_{\text{Si}} = [\% \text{Si}] \text{ რადგან } f_{\text{Si}}^{\text{Cr}} = 1; \quad f_{\text{Si}}^{\text{C}} = 1$$

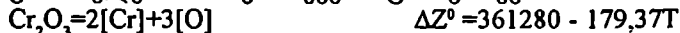
გამოთვლების შედეგები:

Si, %	0,5	0,5	1,0	1,0
C, %	0,02	0,1	0,02	0,1
P _{CO} , 3 ტმ.	4,57 · 10 ⁻²	2,29 · 10 ⁻¹	2,29 · 10 ⁻²	1,15 · 10 ⁻¹

ამრიგად, ვაკუუმური დნობისას Si უფრო ძნელად აღდგება, ვიდრე მანგანუმი. ღრმა აბაზანაში, სადაც ფეროსტატიკური წნევა საკმაოდ მაღალია, Si-ის აღდგენა შეიძლება არც მოხდეს.

7.3.2.3. ქრომის ჟანგის (Cr₂O₃) აღდგენა

გამოთვლები ამ შემთხვევაშიც ისეთივეა



+



$$\Delta Z_{1600^\circ\text{C}}^0 = -43550 \text{ კალ.}$$

$$\lg K = 43550 / 4,575 \cdot 1873 = 5,08 \quad K = \frac{P_{\text{CO}}^3 a_{\text{Cr}}^2}{a_{\text{C}}^3}$$

გამოვიანგარიშოთ CO-ს ორთქლის წონასწორული დრეკადობა უჟანგავი ფოლადისათვის 18 % Cr, 10 % Ni და 0,02 % და 0,1 % C-სათვის. ჩავთვალოთ, რომ ნიკელი არ ახდენს გავლენას

ქრომის აქტიურობაზე 0,02 % C-სათვის $P_{CO}=9,24 \cdot 10^{-2}$ ატმ., 0,1 % C-სათვის $P_{CO}=0,347$. მოყვანილი თერმოდინამიკური გამოთვლები თვისობრივად გეიჩვენებს, რომ ვაკუუმური დნობისას იქმნება Cr_2O_3 -ის ალდგენის პირობები.

მოყვანილი ანალიზური გამოანგარიშებები გეიმტკიცებს ადრე გამოთქმულ მოსაზრებებს, რომ არც Si და არც Mn არ მონაწილეობს რკინისა და რკინა-ქრომის შენადნობის განუანგეაში. რადგან Si-ისა და Mn-ის წარმოქმნილი უანგულები აღდგება ნახშირბადით.

არალითონური ჩანართების აღდგენის შესწავლისას აირადი უაზის 18–23 მმ Hg წნევის დროს, დადგინდა, რომ უფრო მეტად აღდგება MnO და Cr_2O_3 -ის ტიპის ჩანართები (65–76 %), ლითონში 0,1–0,2 % ნახშირბადის შემცველობისას. 0,02 % C-ის შემცველობისას ეს ჩანართები მცირდება 20–25 %-ით. Al_2O_3 ტიპის ჩანართები ნაკლებად აღდგება. პირველად მცირდება დიდი მსხვილი არალითონური ჩანართები, რომელიც, ალბათ დამოკიდებულია ბუშტის წარმოქმნაზე. მსხვილ ჩანართებზე ჩასახული ბუშტის რადიუსი დიდია, ხოლო CO-ს წონასწორული წნევა – მცირე. ამიტომაც, ასეთი ჩანართები აღდგება პირველ რიგში.

ტემპერატურის მომატება ხელს უწყობს უპირველესად ძნელდნობადი ჩანართების აღდგენას, ხოლო დაკლება – ადვილად აღსადგენი ჩანართების აღდგენას.

ჯერ კიდევ საკამათოა საკითხი იმის შესახებ, რომ ჩანართების აღდგენას ხელს უწყობს წნევის შემცირება. თუ ზოგ მკვლევარს მიაჩნია, რომ 25 მმ Hg წნევაზე დაბლა არ ხდება კაჟმიწის აღდგენა, სხვები ამტკიცებენ, რომ წნევის შემცირება საშუალებას იძლევა მივიღოთ ფოლადი არალითონური ჩანართების მცირე რაოდენობით.

ეს შეიძლება იმით აიხსნას, რომ არალითონური ჩანართების აღდგენისა და ამოტივტივების პროცესები ეტყობა. ისეა ერთმანეთში გადახლართული, რომ ძნელი გასარჩევია თუ რომელი მათგანია გადამწყვეტი.

ვაკუუმური დნობის პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ უფრო სრულად განუანგება ის ლითონები, რომლებიც წინასწარ არ იყო განუანგული ძლიერი განუანგეველებით.

7.3.3. თხევადი ლითონისა და ცეცხლგამძლე მასალების ურთიერთქმედება ვაკუუმში

ლითონის ურთიერთქმედებას ცეცხლგამძლე მასალებთან ვაკუუმში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება იმ პროცესებში, რომლებშიც დნობა მიდის ამონაგიან აბაზანებში.

ვაკუუმური ღუმელები ამოიგება უმთავრესად MgO და Al₂O₃-ით. ამიტომ, მიზანშეწონილია განვიხილოთ ლითონის ურთიერთქმედება ამ ჟანგულებთან.

საერთოდ, ცეცხლგამძლე მასალათა ჟანგულების მოქმედება ნახშირბადთან ან შენადნობის ძირითად ელემენტთან შეიძლება განვიხილოთ შემდეგი რეაქციების საფუძველზე.



(7.1) რეაქციით შეიძლება მოხდეს MgO, CaO ან ლითონებში გახსნილი Si, Al-ის ჟანგულების აღდგენა აირადი პროდუქტების წარმოქმნით. Si და Al მოქმედებს ლითონში გახსნილ ჟანგბადთან და წარმოქმნის არალითონურ ჩანართებს.

მე-(7.2) რეაქციით წარმოიქმნება ლითონის ძირითადი ელემენტების ჟანგულები. (7.1) და (7.2) რეაქციების წონასწორობა ვაკუუმში გადაინაცვლებს მარჯვნივ, რეაქციის აირადი პროდუქტების წარმოქმნის გამო. ამ პროცესებს შესაძლებელია მოჰყვეს თხევად ფოლადში ჟანგბადის რაოდენობის გაზრდა.

თეორიული გამოთვლებით გამოდის, რომ 10⁻²–10⁻¹ მმ Hg წნევის დროს ღუმელში ჟანგბადის რაოდენობა ლითონში უნდა იყოს დიდი, რადგან ხდება MgO-ს აღდგენა ამონაგიდან. 10⁻¹–10⁻² მმ Hg წნევისას 7 საათით დაყოვნების შემდეგ ჟანგბადის შემცველობა აღწევს 0,025 %.

შესაძლებელია, რომ დაყოვნების გაზრდით გაიზარდოს ჟანგბადის შემცველობაც თხევად ლითონში. აღსანიშნავია, რომ ამონაგიდან ლითონში ჟანგბადის გადასვლის სიჩქარე ალბათ ძალზე მცირეა. ამიტომ თხევადი ლითონის 1–2 საათით დაყოვნებით ჟანგბადის გადასვლა ფოლადში, მარტოოდენ ლითონის ამონაგთან ქიმიური ურთიერთქმედებით არ შეიძლება ჩაითვალოს ლითონის გატუჭყიანების სერიოზულ მიზეზად. თუ ფოლადი შეიცავს Cr, Si, Al, მაშინ MgO აღდგება უფრო მეტად და ამონაგის ჟანგბადით ლითონის გატუჭყიანება მატულობს.

კინეტიკური თვალსაზრისით, ფოლადის გაჯერება ტიგელის MgO-ს ჟანგბადით შეიძლება ხდებოდეს შემდეგი მიმდევრობით.

1. MgO-ს დისოციაცია და O-ს და Mg-ის გახსნა ლითონში



2. მანგანუმისა და ჟანგბადის დიფუზია ლითონის ღუმელთან შეხების ზედაპირიდან ლითონის მოცულობაში;

3. Mg-ის გადაყვანა ლითონის მოცულობიდან აორთქლების ზედაპირისაკენ;

4. Mg-ის ადსორბცია ლითონისა და აირის გამყოფი ზედაპირის ფენებში, $[Mg] \rightarrow Mg_{\text{ads}}$;

5. Mg-ის აორთქლება ატმოსფეროში. $Mg_{\text{ads}} \rightarrow [Mg]$;

თუ აბაზანა კარგად ირევა, პირველი ორი საფეხური არ შეიძლება იყოს დამაბრკოლებელი. დამაბრკოლებელია ბოლო საფეხური – Mg-ის აორთქლება.

7.3.4. ლითონის დეგაზაცია

აქ უშუალოდ განვიხილოთ ლითონში გახსნილი აირის მოშორება ატმოსფეროში:

7.3.4.1. ჟანგბადის მოშორება

შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ვაკუუმში ლითონებიდან ჟანგბადის მოცილების განხილული მექანიზმების გარდა არსებობს სხვებიც – ჟანგბადის მოცილება შეიძლება ზოგიერთი კომპონენტის სუბჟანგეულების აორთქლებით. სუბჟანგეულები – ეს არის უმდაბლესი ჟანგეულები, რომლებსაც ორთქლის მაღალი დრეკადობა ახასიათებს. ამ ჟანგეულების აორთქლებით შეიძლება ავხსნათ. ზოგიერთ შემთხვევაში, მოცილებული ჟანგბადის და დაჟანგული ნახშირბადის რაოდენობებს შორის შეუსაბამობა.

რკინიდან ჟანგბადის პირდაპირი მოცილების განხილვისას ვგულისხმობთ, რომ ჟანგბადის ხსნადობა რკინაში 1600 °C-ზე არის 0,23 %. მაშინ, აირად ფაზაში ჟანგბადის პარციალური წნევაა $4,5 \cdot 10^4$ მმ Hg, რაც შეესატყვისება $2,25 \cdot 10^5$ მმ Hg საერთო წნევას. იმისათვის, რომ შევამციროთ ჟანგბადის შემცველობა სუფთა რკინაში, საჭიროა დნობისას შეექმნათ $2 \cdot 10^5$ მმ Hg-ზე დაბალი წნევა. მაგრამ ამ შემთხვევაში ძლიერ ორთქლდება რკინა. ამიტომ, უნახშირბადო რკინის ჟანგბადისაგან გასუფთავება Fe_2O_3 -ის აორთქლებით პრაქტიკულად შეუძლებელია. ჟანგბადის მოცილება შეიძლება მოხდეს დაბალი ჟანგეულების – ქვეჟანგების აორთქლების საშუალებით. ცნობილია, რომ FeO ჟანგეულების ორთქლის დრეკადობა ჟანგბადით გაჯერებული რკინის ზედაპირზე (როდესაც

X>1) უნდა იყოს 0,1–0,5 მმ Hg, 1550–1700 °C ტემპერატურის ფარგლებში.

ჟანგბადის ხსნადობა ნიკელში 1500 °C ტემპერატურაზე არის 0,38 %. ეს ეთანადება NiO-ს დისოციაციის დრეკადობის ან ჟანგბადის პარციალურ წნევას $6,3 \cdot 10^{-2}$ მმ Hg, ანუ საერთო წნევას 0,31 მმ Hg. ამიტომ თუ თხევადი ნიკელის ზედაპირზე შევამცირებთ საერთო წნევას, ჟანგბადი უნდა მოსცილდეს ნიკელს.

7.3.4.2. წყალბადისა და აზოტის მოცილება

თუ წყალბადი არ წარმოქმნის ჰიდრიდებს თხევად ლითონში, მაშინ, ეტყობა, მასში გახსნილა კათიონების სახით. თხევად ლითონში აზოტის არსებობის ფორმები ჯერ მთლიანად გარკვეული არ არის, თუ კი ის არ იმყოფება ნიტრიდული ჩანართების სახით.

თხევადი ლითონიდან აზოტისა და წყალბადის მოცილების სქემა, რომელიც ასე თუ ისე აკმაყოფილებს სინამდვილეს, შემდეგნაირია:

1. წყალბადის და აზოტის გახსნილი ატომების გადაადგილება თხევადი ლითონის მოცულობაში (გადაადგილებაში იგულისხმება: მასის გადაცემა კონვექციური ნაკადებით და დიფუზია. ფაზების გამყოფ საზღვრებზე არსებულ აურეველ ფენებში). აზოტის და წყალბადის ატომების გადატანა ხორციელდება ლითონის მოცულობიდან გამყოფი საზღვრებისაკენ (ლითონი-ამონაღი, ლითონი-აირადი ატმოსფერო ლითონის აბაზანის ზევით, ლითონი-ბუშტები, რომლებიც იმყოფება ლითონში)

2. აზოტის და წყალბადის ატომების ადსორბცია ზედაპირულ ფენებში;

3. გამყოფ საზღვრებზე აზოტისა და წყალბადის ატომების რეკომბინაცია აირის მოლეკულებად;

4. აირის მოლეკულების დესორბცია;

5. აზოტის და წყალბადის მოლეკულების გადაყვანა აირად ფაზაში. მათ შორის ბუშტების ამოსვლა ლითონში, ლითონის ზედაპირიდან აირების მოშორება ვაკუუმური ტუმბოებით.

ლითონის დეგაზაციის სიჩქარე იანგარიშება ყველაზე დაბალი საფეხურის სიჩქარით.

განვიხილოთ ვაკუუმური დნობისას წყალბადის მოშორების ზოგიერთი შემთხვევა. ცნობილია, რომ წყალბადის ხსნადობა ექვემდებარება სივერტსის კანონს: $[\%H] = K \sqrt{P_{H_2}}$ წყალბადის 1 ატ.

წნევისას, სიდიდე K უნდა უდრიდეს წყალბადის ხსნადობას. ლითონში $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე წყალბადის ხსნადობა სუფთა რკინაში არის $0,0027\%$, ხოლო ხსნადობის მუდმივის და თავისუფალი ენერჯიის დამოკიდებულება ასე გამოიხატება:

$$\lg K = -\frac{1750}{T} - 1,68; \Delta Z_0 = 8000 + 7,68T.$$

ანგარიში გვიჩვენებს, რომ ლითონში წყალბადის $0,0001\%$ შემცველობისას წყალბადის პარციალური წნევა უნდა იყოს $P_{H_2} = (0,0001/0,0027)^2 = 1,05 \text{ მმ Hg}$.

მრავალრიცხოვანი ცდები ამტკიცებს, რომ წყალბადის შემცველობა თხევად ლითონში კარგად ეთანხმება სიფერტისის კანონს. აღსანიშნავია, რომ ფოლადში C, Si, Mn, Ni, Cr მცირე შემცველობების პირობებში წყალბადის ხსნადობა და აქტიურობა თითქმის უცვლელი რჩება სუფთა რკინასთან შედარებით.

აზოტის ხსნადობა ლითონში ვაკუუმის პირობებში, აგრეთვე უნდა ემორჩილებოდეს სიფერტისის კანონს. სუფთა რკინისათვის $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე აზოტის ხსნადობის განტოლება შემდეგნაირად გამოიყურება

$$[\%N] = 0,043 \sqrt{P_{N_2}},$$

ხოლო წონასწორობის მუდმივას დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ასეთია:

$$\lg K = -\frac{188}{T} - 1,266; \Delta Z^0 = 860 + 5,71T.$$

თეორიულად უკვე 4 მმ Hg წნევისას ლითონში უნდა დარჩეს $0,003\% N$. მაგრამ რეალურ შენადნობებში ვაკუუმირების მერე აზოტის შემცველობასა და ღუმელში წნევას შორის ურთიერთდამოკიდებულება ირღვევა. აზოტი წყალბადთან შედარებით ძნელად გამოიდევენება, რადგან ის წარმოქმნის მტკიცე ნიტრიდებს Ti, Zr, Al -თან, რომელთა დისოციაციის დრეკადობა უფრო მცირეა. ვიდრე მიღწეული წნევა ლითონის ზედაპირზე. საჭიროა იმასაც მიექცეს ყურადღება, რომ ლითონში არსებული Cr, Ti, V, Nb ამცირებს აზოტის აქტიურობის კოეფიციენტს შენადნობში და ამით მყარად აკავებს აზოტს მასში. აზოტის გამოყოფას ხელს უშლის ის გარემოებაც, რომ წყალბადთან შედარებით მისი დიფუზიის კოეფიციენტი მცირეა ($D_N = 1-4 \cdot 10^{-4} \text{ სმ}^2/\text{წმ}$). მეორე მხრივ, ნახშირბადი და კაუბადი ზრდის აზოტის აქტიურობას და ხელს უწყობს მის განდევნას.

აზოტის განდევნა შეიძლება მოხდეს როგორც ბუშტების წარმოქმნით, ასევე კონვექციური გადატანით აირად ფაზაში. აზოტი

შესამჩნევად გამოიყოფა ლითონიდან დუღილის დროს. CO-ს ბუშტები რევენ ლითონს და ამით აჩქარებენ აზოტის დიფუზიურ განდევნას. CO-ს ბუშტების წარმოქმნა უზრუნველყოფს აზოტის გამოყოფას ამ უკვე მზა ბუშტებში.

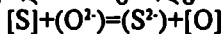
Fe-Cr, Fe-Cr-Ni შენადნობებიდან აზოტის ვაკუუმში გამოყოფის კინეტიკის შესწავლით გამოირკვა, რომ ტემპერატურის ან ტიგელში ლითონის კუთრი ზედაპირის გაზრდით დეაზოტირების პროცესი საგრძნობლად ჩქარდება.

7.3.5. განგოგირდება (დესულფურაცია) ვაკუუმში

გამოკვლევებმა გეიჩენა, რომ ვაკუუმურ ღუმელებში ლითონის დნობისას არ ხდება შესამჩნევი განგოგირდება. აორთქლების გზით გოგირდის შემცველობის საგრძნობი შემცირებისათვის აუცილებელია დნობის წაყვანა 0,001 მმ Hg წნევის ქვევით. თანაც, ლითონი ამ წნევის ქვეშ დიდხანს უნდა იყოს.

წილის წარმომქმნელების გამოყენება საგრძნობლად აადვილებს ფოლადის განგოგირდების პროცესს ვაკუუმში. ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელის ამონაგის კედლები, როცა შეღებეს ახლად გამომწვარი კირით, მაშინ 0,002 მმ Hg წნევისას გოგირდის შემცველობა დავარდა 0,03-დან 0,002-0,003 %-მდე. მეორე შემთხვევაში, ვაკუუმირების წინ ლითონის ზედაპირზე დაყარეს კირის და მლღობი შპატის ნარევი. ამ დროსაც გოგირდის შემცველობამ დაიკლო 0,03-დან 0,01 %-მდე. დესულფურაციის ხარისხმა კი მიაღწია 80 %-ს.

წილის გამოყენების შემთხვევაში, გოგირდის გადაყვანა თხევადი ლითონიდან წიდაში შეიძლება ასე გამოვსახოთ

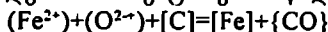


$$K = \frac{a_{(S^2)} \cdot a_{[O]}}{a_{[S]} \cdot a_{(O^2)}}$$

ეს რეაქცია მიმდინარეობს აირადი ფაზის მონაწილეობის გარეშე, ამიტომაც კომპონენტების აქტიურობების მნიშვნელობები, რომლებსაც შეიცავს წონასწორობის მუდმივას განტოლება, არ არის დამოკიდებული სამუშაო არის წნევაზე.

თხევადი ლითონი და, განსაკუთრებით, ფოლადი, ყოველთვის შეიცავს ნახშირბადს. ვაკუუმში ლითონის დნობისას ნახშირბადისა და ჟანგბადის ურთიერთქმედების რეაქციის წონასწორობა იხრება რეაქციის აირადი ფაზის წარმოქმნისაკენ ე.ი. CO-ს წარმოქმნი-

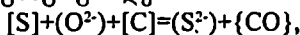
საკენ. ვაკუუმური დნობის პირობებში ლითონში ნახშირბადის არსებობა ხელს უწყობდეს არა მარტო ლითონის განჟანგვას, არამედ FeO-ს რაოდენობის შემცირებას წიდაში.



$$K = \frac{P_{\{CO\}}}{a_{(Fe^{2+})} \cdot a_{(O^{2-})} \cdot a_{[C]}}; \quad a_{(Fe^{2+})} = \frac{1}{K} \cdot \frac{P_{\{CO\}}}{a_{(O^{2-})} \cdot a_{[C]}}$$

წიდაში რკინის კათიონების (Fe^{2+}) აქტიურობის დაბალი მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ, როდესაც რკინა აღარ იღებს მონაწილეობას რეაქციაში, ნახშირბადის შემდგომი ურთიერთქმედება ჟანგბადთან ვაკუუმური დნობის პირობებში შეიძლება განხორციელდეს მხოლოდ წიდაში შექმნილი უარყოფითი მუხტების შემცირებული რაოდენობის აღდგენის გზით წიდაში გოგირდის ანიონების გადაყვანით.

ამრიგად, C და O-ს ურთიერთქმედების რეაქციას თან უნდა მოჰყვეს ლითონის განგოგირდება:



$$K = \frac{a_{(S^{2-})} \cdot P_{\{CO\}}}{a_{[S]} \cdot a_{(O^{2-})} \cdot a_{[C]}} = L_S \frac{P_{\{CO\}}}{a_{(O^{2-})} \cdot a_{[C]}}$$

$$L_S = K \frac{a_{(O^{2-})} \cdot a_{[C]}}{P_{\{CO\}}}$$

L_S - წიდასა და ლითონს შორის გოგირდის განაწილების კოეფიციენტი.

ბოლო შეფარდებიდან გამოდის, რომ წიდაში ნარევეების გამოყენებამ საგრძნობლად უნდა აამაღლოს ვაკუუმში განგოგირდების ხარისხი. ერთნაირ პირობებში (ტემპერატურა, წიდას შედგენილობა, ლითონში ნახშირბადის შემცველობა) წნევის შემცირებამ უნდა გამოიწვიოს რეაქციის გადახრა L_S -ის მნიშვნელობის გაზრდისაკენ და ამიტომაც ვაკუუმში განგოგირდება უფრო სრულად უნდა მოხდეს, ვიდრე ატმოსფერულ წნევისას.

თხევადი ლითონის განგოგირდებისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მასში ნახშირბადის შემცველობას. 0,35 % ნახშირბადის შემცველობისას ლითონის დესულფურაციის ხარისხის კოეფიციენტებში სხვაობა, ლითონის დნობისას ვაკუუმში წიდას ქვეშ და ატმოსფერული წნევისას არის 77 და 13 % შესაბამისად. განგოგირდების ხარისხი იანგარიშება ფორმულით

$$\alpha = \frac{[\%S_{\text{ნაწ.}}] - [\%S_{\text{რაიმე დროის შემდეგ}}]}{[\%S_{\text{ნაწ.}}]} \cdot 100\%$$

1,19 % C-ს შემცველი ფოლადებისათვის, ეს განსხვავებები მცირეა – 95 და 84 %. ეს იმით აიხსნება, რომ ლითონში დიდი რაოდენობით გოგირდის შემცველობისას წილებში შეიძლება იარსებოს FeO-ს მცირე რაოდენობამ. თანაც წნევას ღუმელში არ შეუძლია დიდი გავლენა მოახდინოს წიდის დაუნეგულობაზე. 0,5 %-ზე ნაკლები ნახშირბადის შემცველი ფოლადებისათვის, ვაკუუმური დნობის დროს FeO-ს რაოდენობა წიდაში უფრო ნაკლებია, ვიდრე ატმოსფერულ წნევაზე დნობისას. ამიტომ, განგოგირდების მაღალი კოეფიციენტის მიღება ვაკუუმურ ღუმელებში უფრო ადვილია. თუ წიდას ჩავტვირთავთ ღუმელის ქვედაზე ჯართის ქვეშ, მაშინ უკვე ლითონის დნობისას მიიღწევა განგოგირდების მაღალი კოეფიციენტი. ამ პირობებში წიდისა და ლითონის შეხების ზედაპირი უდიდესია, ხოლო FeO-ს რაოდენობა წიდაში უმცირესი.

7.3.6. თხევადი ლითონიდან კომპონენტების აორთქლება

თხევადი ლითონიდან მინარევების აორთქლების სქემა შემდეგნაირად არის წარმოდგენილი:

1. მინარევების ატომების გადატანა ლითონის მოცულობიდან გამყოფ საზღვრებზე: ლითონი-ამონაგი, ლითონი-აირის ატმოსფერო ლითონის ზევით;

2. მინარევების ატომების აღსორბცია ზედაპირულ ფენებში;

3. დესორბცია;

4. დესორბირებული ატომების გადაყვანა აირად ფაზაში.

თხევადი ლითონიდან კომპონენტების აორთქლება დამოკიდებულია ხსნარში კომპონენტების აქტიურობაზე, ხსნარების ზედაპირზე კომპონენტის ორთქლის დრეკადობასა და აირადი ფაზის წნევაზე ხსნარების ზედაპირზე.

კომპონენტების აორთქლების მექანიზმის შესასწავლად საჭირო თეორიული გამოთვლები საკმაოდ რთულია და შეიცავს ბევრ დაშვებას. ჩვენ განვიხილოთ ზოგიერთი ლითონის ვაკუუმში აორთქლების მხოლოდ პრაქტიკული მონაცემები.

სპილენძი. საერთოდ, ვაკუუმურ ღუმელებში ხდება სპილენძის კონცენტრაციის საგრძნობი შემცირება. მაგ. 0,33–0,5 %-დან 0,0031–0,169 %-მდე 1 საათის შემდეგ და 0,002–0,028 %-ი 7 საათის შემდეგ.

დარიშხანი. დარიშხანის აორთქლებას რკინიდან თან სდევს რკინის დიდი დანაკარგი. მაგალითად, 50 % დარიშხანის აორთქლებისას იკარგება 20 % რკინა.

მანგანუმი. მანგანუმის აორთქლება რკინის შენადნობიდან დიდი სისწრაფით მიმდინარეობს. მაგალითად, უჟანგავე ფოლადების გადადნობისას, რომლებიც შეიცავს 1,3 % Mn-ს 1 საათის შემდეგ რჩება 0,30 %. საერთოდ დადგენილია, რომ აორთქლება Mn-ის 70–85 %. განსაკუთრებით შესაძინევა მანგანუმის აორთქლება 0,02–0,07 მმ Hg წნევისას თუ მისი კონცენტრაცია 0,5 %-ზე მეტია.

ქრომი. ქრომის დანაკარგები მცირეა მანგანუმთან შედარებით, მაგრამ ქრომიანი შენადნობის გადადნობისას მხედველობაშია მისაღები. მაგალითად, უჟანგავე ფოლადის გადადნობისას, რომელშიც 19,7 % ქრომი იყო, 1 საათის შემდეგ დარჩა 19 % ე.ი. ქრომი ფარდობითმა შემცირებამ შეადგინა ~3,6 %-ით.

მოლიბდენი, ვოლფრამი, ტანტალი. ამ კომპონენტების აორთქლის დრეკადობა ძალიან დაბალია. ამიტომ თხევადი ლითონის ვაკუუმირებისას მათი აორთქლება არ ხდება. ეს ელემენტები შეიძლება დაიკარგოს იმ შემთხვევაში, თუ ლითონში ბევრი ჟანგბადია და წარმოიქმნება Mo-ის და W-ის ჟანგეულები. ისინი ძალიან აქროლადია, Ta-ს ჟანგეულები კი – არა, მაგრამ ამონაგაში შეიწოვება, რის გამოც ტანტალის კონცენტრაცია ლითონში მცირდება.

ალუმინი, ტიტანი. შენადნობიდან მათი აორთქლება ვაკუუმირებისას არ ხდება. ეს კომპონენტები მხოლოდ იმ შემთხვევაში იჟანგება, როცა ლითონში ბევრია ჟანგბადი. ჟანგეულები ამოტივტივდება ლითონის ზედაპირზე. ამგვარად მცირდება ლითონში ალუმინისა და ტიტანის შემცველობა.

ნიკელი. თხევადი ლითონის ვაკუუმირების შემდეგ ნიკელის კონცენტრაცია არ იცვლება. იგი შეიძლება გაიზარდოს კიდევ სხვა ელემენტების აორთქლების გამო.

კაუბადი. თხევადი ლითონის ვაკუუმირებისას კაუბადის აორთქლების შესახებ ჯერ ერთიანი შეხედულება არ არსებობს. ზოგი მეცნიერის შეხედულებით 10^3 მმ Hg წნევისას პირველ 15 წუთის განმავლობაში არ შეიმჩნეოდა კაუბადის შემცველობის გაზრდა. სხვა მეცნიერები ამტკიცებენ, რომ 7 საათის დაყოვნების შემდეგ შეიმჩნევა კაუბადის შემცველობის უმნიშვნელო შემცირება. გამდნარ ლითონში კაუბადის შემცველობის ცვლილებაზე ძირითად გავლენას ახდენს ამონაგას შედგენილობა, რადგან ყველა ცვეცხლგამძლე მასალის შედგენილობა შეიცავს კაუბადის ამა თუ იმ რაოდენობას.

დნობა ვაკუუმურ დანადგარებში

ლითონთა სადნობი ვაკუუმური დანადგარები თავისი დანიშნულების მიხედვით იყოფა რამდენიმე ჯგუფად. ჯგუფებად დაყოფა გამოწვეულია მიღებული ლითონის დანიშნულებით. ზოგი დნობის მეთოდი კი შეუძლებელია ვაკუუმის გარეშე. ჩვენ განვიხილავთ ვაკუუმური დნობის რამდენიმე ძირითად დანადგარს. ესენია: ვაკუუმური ინდუქციური, რკალური და ელექტრონულ-სხივური დანადგარები.

7.4.1. დნობა ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში

ვაკუუმური ინდუქციური ღუმელის მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ ვაკუუმის კამერაში მოთავსებულ ცეცხლგამძლე ტიგელში მაღალი სიხშირის ინდუქტორით ადნობენ მყარ კაზმს. კაზმი შედგება წინასწარ შერჩეული ნამზადების ნარჩენების, სუფთა ლითონებისა და ფეროშენადნობებისაგან. შემდგომ გამდნარ ლითონს ახალასებენ. ღუმელები მუშაობს თხევად ჩანატვირთზეც.

ვაკუუმურ-ინდუქციური დნობის უპირატესობა შემდეგში გამოიხატება:

1. ლითონის საფუძვლიანი დეგაზაცია, ფლოტაცია და თხევადი ლითონის დიდი ხნით ვაკუუმში გაჩერებისა და ინდუქციური დენებით თხევადი ლითონის კარგი არევის წყალობით, არალითონური ჩანართების გამოყოფა;

2. აქროლადი კომპონენტების მინარევების მოშორება მაღალი ტემპერატურის, დაბალი წნევისა და ღუმელში თხევადი ლითონის დიდი ხნით გაჩერების მეშვეობით;

3. ნებისმიერი საკაზმე მასალებისაგან თითქმის ყველა რთული შედგენილობის შენადნობის გამოდნობის შესაძლებლობა;

4. დიდი წარმადობა;

5. რთული სხმულების წარმოების შესაძლებლობა, მათ შორის ცენტრიდანული ჩამოსხმით.

უარყოფით მხარეებს ეკუთვნის:

1. ვაკუუმში თხევადი ლითონის ურთიერთქმედება ტიგელის ამონაგთან, რაც იწვევს ლითონის დახალასების შენელებას და ლითონის გაჭუჭყიანებას მინარევებით;

2. ტიგელების დაბალი მედეგობა, რაც იწვევს ღუმელის მუშაობის პირობებისა და ტექნიკურ-ეკონომიკური ზაჩვენებლების გაუარესებას;

3. დანადგარის სირთულე და დიდი ზომები.

დღესდღეობით ვაკუუმური ინდუქციური ღუმელების ტევადობა აღწევს 30-40 ტ თხევადი ჯართისათვის. თანაც, ღუმელში ასხამენ სხვა, ჩვეულებრივ ფოლადსადნობ ღუმელებში გამოდნობილ ლითონს. ტევადობის მიხედვით, ვაკუუმური ღუმელები იყოფა: ლაბორატორიულად – 20-25 კგ-მდე, ნახევრად საწარმოო 100 კგ-მდე და საწარმოო – 100 კგ-ზე მეტი.

ვაკუუმური ინდუქციური სადნობი დანადგარი შედგება: საინდუქციო კოჭასაგან ტიგელთან ერთად; პერმეტული კორპუსისაგან – სადნობი კამერა; ვაკუუმის შესაქმნელი სისტემისაგან; მაღალი სიხშირის დენის წყაროსაგან; დნობის ჩასატარებელი და პროცესის სამეთვალყურეო დამხმარე მოწყობილობებისაგან; ლითონის ჩამოსხმის მოწყობილობისაგან.

მუშაობის მეთოდის მიხედვით ღუმელები ორი სახისაა: პერიოდული და ნახევრად უწყვეტი მოქმედების.

პერიოდული მოქმედების ღუმელები ყოველი დნობის შემდეგ უნდა გაიხსნას, რომ შეიცვალოს ბოყეი ან საჩამოსხმო ფორმა, ჩაიტვირთოს კაზმი – ეს კი იწვევს ვაკუუმის დარღვევას.

ნახევრად უწყვეტი მოქმედების ღუმელები საშუალებას იძლევა ზედიზედ ჩატარდეს რამდენიმე დნობა სადნობი კორპუსის გაუხსნელად. დნობების რიცხვი დამოკიდებულია ტიგელის მედეგობაზე. ამ დანადგარებში ბოყეების გამოცვლა ხდება რაბული მოწყობილობით, რომელსაც გააჩნია ფარგამყოფი, რომელიც რაბს ღუმელის კორპუსისგან აცალკევებს. რაბი მიერთებულია ტუმბოებთან. ღუმელის ჩატვირთვაც ასეთივე რაბული მოწყობილობით ხდება, რომელიც ჩვეულებრივ ტიგელის ზემოდან არის მოთავსებული ღერძულად. ჯართს ათავსებენ ჩასატვირთ კალათში. რომელსაც გასახსნელი ძირი აქვს. ჩასატვირთი კამერა გამოყოფილია სადნობისაგან ფარგამყოფით. ზევიდან კი დახურულია სახურავით. ჩასატვირთ კამერაც აგრეთვე მიერთებულია ტუმბოებთან. ნახევრად უწყვეტმა ღუმელებმა დიდი გამოყენება პოვა წარმოებაში. პერიოდულად მოქმედ ვაკუუმურ ღუმელებთან შედარებით, მათ მთელი რიგი უპირატესობები აქვთ. ჯერ ერთი, მთელი მუშაობის განმავლობაში ღუმელის კორპუსი ვაკუუმში იმყოფება და ამიტომ აღარ არის საჭირო დროის ხარჯვა ღუმელის კამერიდან პაერის ამოსატუმბად. მეორეც, იზრდება ტიგელის მედეგობა, რადგან იგი ისე აღარ ცივდება დნობებს შუა. ცნობილია, რომ

ამონაგის ცეცხლგამძლე მასალები თერმულ ცვლილებებს კარგად ვერ უძლებენ. მესამეც, მცირდება იმის შესაძლებლობა, რომ ამონაგის კედლები გაიფლინოს ჟანგეულებით, რომლებიც წარმოიქმნება დნობის გამოშვების შემდეგ დარჩენილი ლითონის დაჟანგვით, როცა ღუმელის კამერა იხსნება.

ვაკუუმურ-ინდუქციურ ლაბორატორიულ და სამრეწველო ღუმელებს შორის ძირეული განსხვავებები არ არის. რასაკვირველია, ლაბორატორიულ ღუმელზე, რომლის დანიშნულებაა არა მეტი ლითონის გამოშვება, არამედ მეცნიერული სამუშაოების ჩატარება, გაცილებით ადვილად მიიღება დაბალი წნევაც, მოსახერხებელია ჩატვირთვაც, მალეგირებელი მასალის მიწოდებაც და ა.შ. ამიტომ განვიხილოთ სამრეწველო დანადგარების ზოგიერთი კონსტრუქცია.

7.4.1.1. ვაკუუმურ-ინდუქციური სამრეწველო ღუმელები

ჰერეუსის 12 ტ ტევადობის ღუმელს აქვს ჰორიზონტალური ცილინდრული კორპუსი გამოსაგორებელი სახურავით, რომელზედაც დამაგრებულია ინდუქტორი ტიგელით. ბოყვების რაბული კამერა უერთდება ღუმელის კამერას გვერდიდან. ვაკუუმური სისტემა შედგება სამი ორროტორიანი ტუმბოსა (ამოტუმბვის სიჩქარე 7000, 2000 და 1000 ლ/წმ) და ორი ბუსტერული ტუმბოსაგან (ამოტუმბვის სიჩქარე 4500 ლ/წმ).

ტიგელის ზევით კორპუსზე მოთავსებულია რევილვერული ტიპის მოწყობილობა, რომელიც სურვილის მიხედვით აყენებს: ჩასატვირთ კალათს, მოსარევე ძალაყინს, თერმოწყვილს და სინჯების ასადებ ხელსაწყოს. ეს მოწყობილობა გამოყოფილია ღუმელის კამერისაგან შესაბამისი საკეტით.

ღუმელი OKB-571B ზემოდან იხურება სახურავით, რომელიც იხსნება ამწეით ვაკუუმის და გამაცივებელი წყლის სადინარების მოხსნის შემდეგ. სახურავზე მოთავსებულია რაბული მოწყობილობა ღუმელში კაზმის ჩასატვირთად. ჩასატვირთი კამერის შიგნით ჩამოკიდებულია კალათი აწონილი კაზმით. კალათის ძირი მრავალსექტორიანია, და ისინი ერთმანეთთან თოკით ან მავთულით არის შეერთებული. ცხელ ტიგელში კალათის ჩაშვებისას თოკი იწვება (მავთული კი დნება) და კაზმი კალათიდან გამოიყრება. სადნობი კამერიდან ჩასატვირთი კამერა გამოყოფილია ფარსაკეტებით, ზემოდან კი დახურულია სახურავით. სახურავზე მოთავსებულია აგრეთვე რაბული მოწყობილობა თერმოწყვილისთვის, ასარევი ძალაყინისთვის და ჩასახედი ფანჯარა. ღუმელის

კორპუსშიაც ჩატანებულია საჭერეტი ფანჯრები და ჩობალური შემამჭიდროებელი ძალაყინისათვის, რომელიც ცივდება პაერით, იგი საჭიროა ღუმელის გასაწმენდად და წიღის შესაწერებლად ლითონის ბოყეში ჩასხმისას. ინდუქტორის გარსაცმი მზადდება უჟანგავი ფოლადისაგან, შუშატექსტოლიტური ფილებისაგან, რომელიც ეყრდნობა კორპუსზე მიდრეხულ პოტოტიკებს (სატაცებს). ღუმელის ინდუქტორი სამნაწილიანია. ინდუქტორის ყველა მიმყვანი გადის შემამჭიდროებელ შუშატექსტოლიტურ ფილებში, რომლითაც თავდება დენმიმყვანი მილი.

ინდუქტორის დახრა ხორციელდება მოქნილი კაეშირისა და დამხრელი მექანიზმის მეშვეობით. დახრას აწარმოებენ დენმიმყვანებით, რომელთა ბოლოები გარეთ არის გამოყვანილი.

ლითონს ასხამენ ერთ ან ორ ბოყეში, რომლებიც ურიკაზე არის მოთავსებული. ბოყეებზე ზევიდან დაყენებულია ძაბრები. რომლებიც ლითონის ტავლს სასურველ მიმართულებას აძლევს და აწერებს წიღის ნატრებს.

დღესდღეობით არსებული ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელების კონსტრუქციები საშუალებას არ იძლევა გადაიჭრას ლითონის ჩამოსხმის საკითხი. როგორც ცნობილია, ყველა არსებული ფოლადსადნობი პროცესისას ლითონი ბოყეებში ცივხვიდან ისხმება. ეს საშუალებას იძლევა განვაკალკეოთ ლითონი და წიდა; ჩამოსხმა შეიძლება შეეწყვიტოთ, როცა ჩამოსხმება მთელი ლითონი, ასეთი ხერხით ჩამოსხმისას ცივხვში ლითონიდან ამოტივტივდება არალითონური ჩანართები (განსაკუთრებით – დიდი ზომების). ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელიდან ლითონი უშუალოდ ისხმება ბოყეში ძაბრის საშუალებით. ძაბრის ზომები პატარაა, ის მხოლოდ მიმართულებას აძლევს თხევად ლითონს და ვერ აბრკოლებს წიღის მოხვედრას სხმულში. ალბათ საჭიროა შუალედური ცივხვის გამოყენება.

ОКБ-571Б ღუმელში ბოყეი შედის ბოყეების კარებიდან, რომელიც ღუმელის კამერიდან საკეტით არის გაყოფილი. ბოყეების კამერასაც თავის მხრივ გარედან აქვს საკეტი და ემსახურება ცალკე ამოსატუმბი მოწყობილობა. აღსანიშნავია, რომ ამ ღუმელის ტვეადობა სრულებით არ არის საკმარისი ისეთი სხმულების ჩამოსასხმელად, რომლებიდანაც შეიძლება მიღების, ფურცლების და ა.შ. დამზადება. იგი გამოუყენებელია აგრეთვე ვაკუუმური რკალური ღუმელის ელექტროდის მისაღებადაც.

მსოფლიოში ყველაზე დიდ ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელად ითვლებოდა ამერიკული ფირმის „ლატრობ სტილის“ ღუმელი. ის მუშაობს, როგორც თხევად (27 ტ), ასევე მყარ (13.5 ტ)

ჩანატვირთზე. ცილინდრული ფორმის (6,6 მ) სადნობი კამერა დგას ვერტიკალურად და მისი სიმაღლეა 7,2 მ. სადნობი კამერის მოცულობაა 627 მ³. ბოყეების კამერის სიგრძეა 26,4 მ – სიგანე 2,4 მ სიმაღლე – 5,2 მ მასში იდგმება სამი ურიკა ბოყეებით, რომელთა სიმაღლე 4,5 მ. ურიკებს აქვთ ბაქნები იმისათვის, რომ მათზე სხვადასხვა ზომის ბოყეები დაიდგას. ღუმელში ადნობენ ელექტროდებს რკალური ვაკუუმური გადადნობისათვის (3,8 მ. სიგრძის). სადნობ კამერაში შეიძლება დაიდგეს სხვადასხვა ინდუქტორი ტიგელის ტევადობის მიხედვით. ლითონში სხვადასხვა ელემენტისა და ჯართის ჩასატვირთად იყენებენ სპეციალურ მოწყობილობას – დოზატორს, რომელიც ღუმელის სახურავზე შეიძლება მიგორდეს. ჯართის ჩასატვირთ მოწყობილობაში ათავსებენ 0,8 მ³ მოცულობის ჩასატვირთ კალათს. ლითონი ჩამოისხმება საწერიანი შუალედური ციცხვით.

ღუმელის ტუმბოები უზრუნველყოფს 0,01 მმ Hg წნევის მიღებას დნობისას და 0,2 მმ Hg წნევას თხევადი ლითონის ტიგელში ჩასხმისას. ამოსატუმბი სისტემა შედგება ორთქლწყლიანი, ეექტრორული და ზეთის ორთქლიანი 20 ტუმბოსაგან. ჯამური ამოტუმბვის სიჩქარეა – 3100 მ³/წთ.

7.4.1.2. ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელების ელექტროკვება

ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელები მუშაობენ მაღალი სიხშირის მანქანური გენერატორებით. ამ ღუმელების ელექტრონული რეჟიმის თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ ვაკუუმის პირობებში შესაძლებელია მოხდეს ელექტრონული გარღვევა დანადგარის ნაწილებს შორის, რომლებიც სხვადასხვა პოტენციალების ქვეშ იმყოფება. ძალიან კარგი განმხოლოების (იზოლაციის) და ინდუქტორის ირგვლივ ხელსაყრელ პირობებშიც კი შეიმჩნევა იისფერი ფუჟვადი (მღვივარი) განმუხტვა.

გარღვევა და ფუჟვადი განმუხტვა შეიმჩნევა 2-0,02 მმ Hg წნევის და ინდუქტორზე 400 ვ-ზე მეტი ძაბვისას. ამ შემთხვევაში საჭიროა ინდუქტორის განმხოლოება ან ძაბვის შემცირება. მაგრამ მუშაობა დაბალი ძაბვისას აძნელებს ინდუქტორზე დიდი სიმძლავრის მიწოდებას და ამის გამო დანადგარის მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მ.კ.ე.) ეცემა.

მაღალი ძაბვის პირობებში მუშაობისას გარღვევების თავიდან აცილების მიზნით უნდა ჩატარდეს შემდეგი ღონისძიებები:

1. ელექტრონულ ძალთა ველის დაეკრანება. ინდუქტორის ყოველ ხვიაზე კეთდება დამცველი ეკრანი, რომელიც დამიწებულია ღუმე-

ლის კარკასიდან. ამ შემთხვევაში ელექტრულ ძალთა ველი შემოიფარგლება ინდუქტორით და ეკრანით. გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულების მრუდი გადაინაცვლებს უფრო მაღალი წნეების მხარეს და ამით მცირდება ღუმელში შემთხვევით გაზრდილი წნევისას განმუხტვის წარმოქმნა. მაგრამ ეს მეთოდი მთლიანად ვერ გამორიცხავს გარღვევის შესაძლებლობას, რადგან შეუძლებელია ღუმელის ყველა ნაწილის განმხოლოება.

2. ინდუქტორის ხეიბების განმხოლოება. ამ მეთოდს ამჟამად ძირითადი ყურადღება ექცევა.

განმხოლოების ამორჩევისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნეს მასზე მოქმედი ფაქტორები:

1. ძალთა ველის დიელექტრიკული ძაბვა;
2. ინდუქტორის რხევებით შექმნილი მექანიკური დატვირთვები;
3. ლითონის აორთქლება, კონდენსაცია, ლითონის გადმოსხმა

ტიგელიდან;

4. თბური მოქმედება.

განმხოლოება შესაძლებელია განხორციელდეს ლაქის რამდენიმე ფენის წასმით. ზევიდან ეხვევა რამდენიმე ფენა მინაქსოვილი. მაგრამ განმხოლოება თავისთავად არ გამორიცხავს გარღვევას, რადგან ის იშლება ფუჟვადი განმუხტვით. განმხოლოება მაშინაა გამოსაყენებელი, როდესაც სამუშაო ძაბვა არ აღემატება გამრღვევ ძაბვას.

მხოლოდ განმხოლოების და ეკრანირების ერთობლიობა გამორიცხავს ფუჟვად განმუხტვას. ამ დროს განმამხოლოებელ ლაქს ზემოდან უსვამენ ელექტროგამტარი მასალის ფენას, მაგ., გრაფიტის ლაქი და სხვ. ეს ფენა ელექტრულად შეერთებულია ღუმელის კარკასთან.

რუსული ღუმელების სამუშაო ძაბვაა 1000 ვ, უცხოურების კი უმთავრესად 400-800 ვ.

დიდი ინდუქციური ღუმელების მუშაობისას სერიოზულ პრობლემას წარმოადგენს ლითონის არევა. დიდი ინდუქციური ღუმელების შექმნამდე ეგონათ, რომ თხევადი ლითონი მათშიც ისევე კარგად აირეოდა ინდუქციური დენებით, როგორც ეს პატარა ღუმელებში ხდება. გამოირკვა, რომ ღუმელებისათვის მაღალი სიხშირის დენებით ლითონის არევა საკმარისი არ არის და მათ დაუყენეს ამრევეები. მაგ., OKI-571B ღუმელზე ლითონის ასარევად გამორთავენ მაღალ სიხშირეს და რთავენ ძალოვან ტრანსფორმატორს 60 კვ სიხშირით. სამი წუთის განმავლობაში აბაზანა მთლიანად ერთგვაროვანი ხდება.

7.4.1.3. ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელების ცეცხლგამძლე ტიგელები

ვაკუუმურ-ინდუქციური სადნობი ღუმელის ტიგელი დანადგარის უმნიშვნელოვანესი ნაწილია: ტიგელის მედეგობაზეა დამოკიდებული ღუმელის წარმადობა და გამოსადნობი ლითონის ხარისხი. ამჟამად დიდი ღუმელების ტიგელების მედეგობა რამდენიმე ათეული დნობაა, პატარებისა, როცა დნება ერთი და იგივე შედგენილობის შენადნობი, რამდენიმე ასეული.

ტიგელების დასამზადებლად გამოიყენება ელექტროშემდნარი სუფთა ცეცხლგამძლე მასალები: Mg, Al, Zr-ის, ჟანგეულები, მათი ნარეგები.

ელექტროშემდნარი ჟანგეულების გამოყენება უზრუნველყოფს ჟანგეულებში მოცულობითი და სხვა გარდაქმნების დასრულებას, არასასურველი ნაერთების მოშორება, მანამდე, სანამ იგი ტიგელის დასატკეპნად გამოიყენება. მცირე ზომის ღუმელებში ტიგელს ტკეპნიან უშუალოდ ღუმელში. მაგრამ წარმადობის გაზრდის მიზნით უფრო ხელსაყრელია გექონდეს რამდენიმე სათადარიგო ინდუქტორი ერთი ღუმელისათვის და ტიგელი დაიტკეპნოს ღუმელის გარეთ, სპეციალურ მოედანზე. ტიგელის დატკეპნის წინ განმხილოებული ინდუქტორი შიგნიდან ილესება საგოზავი თხელი ფენით იმისათვის, რომ ფხვიერი მასალები დატკეპნისას არ გამოიყაროს ინდუქტორის ხეივებს შორის ღრეჩოებიდან. საგოზავად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სხვადასხვა მასალა: მარშალიტი და ტალკი არეული ვინიფლექსის ლაქთან; მინაქსოვილი; ეთილსილიკატი, რომელიც შედგება ცირკონიუმის ნაფქვისაგან, 25 % ელექტროკორუნდი №100-საგან და 25% ელექტროკორუნდი №300-საგან. გალესილ საგოზავს აშრობენ და ტიგელს ტკეპნიან რკინის ან გრაფიტის შაბლონის მიხედვით.

ტიგელის ხარისხზე ძლიერ მოქმედებს გამოყენებული მასის მარცვლების ზომები. იმისათვის, რომ მივიღოთ ტიგელის მკერივი შემცხვარი სამუშაო და სქელი ბუფერული ფხვიერი ფენა, საჭიროა დავიცვათ მსხვილი და წვრილი მარცვლების გარკვეული შეფარდება. ბუფერულმა ფენამ უნდა მიიღოს თავის თავზე და უჩინებელყოს მავნე გავლენა: ინდუქტორის ხეივების მოძრაობა, გამოწვეული მაგნიტური ველებით; დაჭიმვები, გამოწვეული ტიგელზე მექანიკური ზემოქმედებით; ტიგელის ცეცხლგამძლე მასალებში თბური მოცულობითი ცვლილების გავლენა. თუ ტიგელი მარტო წვრილი მარცვლებით არის დატკეპნილი, მაშინ იგი გამოდის ძალიან მკერივი, სწრაფად ცხვება და აქვს მიდრეკილება გაბზარვისადმი.

მაგალითად, ტიგელის დასატკეპნ მასას, რომელიც შედგება 94 % მდნარი Mg-ის ქანვისაგან და 6 % ელექტროკორუნდისაგან, უნდა გააჩნდეს დაახლოებით შემდეგნაირი ფრაქციული შედგენილობა:

MgO	%
მარცვალა 2-3 მმ	30
მარცვალა 1-2 მმ	30
მარცვალა 1-ზე ნაკლები	40
მათ შორის 0,088 მმ	15-20
Al ₂ O ₃	
მარცვალა 0,5-1 მმ	100

კარგად არეული მასა უნდა გამოიწვას და ტიგელი დაიტკეპნოს შემკერელისა და დამნამავის გარეშე. ასე დატკეპნილ ტიგელს მუშაობის კამპანიის ბოლოს აქვს სამუშაო ფენა ~10 მმ. ბუფერული ფენა ~25-30 მმ, რაც უზრუნველყოფს ტიგელის მედეგობას 30 დნობაზე, უკეთეს შემთხვევაში 60 დნობამდე.

ტიგელის ქვედს ტკეპნიან ხელით (მცირე ტიგელების შემთხვევაში) ან პნევმატური სატკეპნით. ქვედის დატკეპნა ხდება თანდათანობით, 30-50 მმ-ის ფენებით. შემდგომი ფენის დატკეპნის წინ უკვე დატკეპნილის ზედაპირზე აფხვიერებენ 5-8 მმ სისქის ფენას და ისე იწყებენ შემდეგის ტკეპნას.

ქვედი ამოჰყავთ პირველ ან მეორე ხვიამდე; შემდეგ ათავსებენ რკინის ფურცლისგან დამზადებულ შაბლონს 2-3 მმ ზომის ნახვრეტებით. შაბლონის ძირზე დებენ ტვირთს, აფხვიერებენ დატკეპნილ ფენას ინდუქტორსა და შაბლონს შორის და იწყებენ ფერდოს ტკეპნას. უფრო მეტად უნდა დაიტკეპნოს შაბლონის მხარე. ღუმელის საყელოს ამოაგებენ მაგნეზიტის ან ქრომომაგნეზიტის აგურებით, ჩამოსასხმელ არხს ცალკე ტკეპნიან.

დატკეპნილტიგელიანი ინდუქტორის ღუმელში ჩადების შემდეგ მას აშრობენ შემდეგი რეჟიმით (0,5 ტ ტვეადობის ღუმელისათვის): 20-30 კვტ სიმძლავერისას – 2 საათი და ყოველი 30 წუთის შემდეგ ამატებენ 30-40 კვტ. ტიგელში ტვირთავენ არმკორკინას ან ნახშირბადიან ფოლადს. პირველ დნობას ატარებენ 1580-1610 °C-ზე თხევადი ლითონის 20-30 წუთის დაყოვნებით, შემდეგ ატარებენ 2-3 გამამარებელ დნობას. ბოლო დნობა თავისი ქიმიური შედგენილობით ახლოს უნდა იყოს იმ ფოლადის ქიმიურ შედგენილობასთან, რომელიც უნდა გამოდნეს ღუმელში.

ძალიან დიდი ვაკუუმური ინდუქციური ღუმელის ამოსაგებად ხმარობენ ცეცხლგამძლე აგურებს, რადგან ამ შემთხვევაში უფრო მიზანშეწონილია ღუმელის ფიზიკური მედეგობის გაზრდა.

ამონაგი შედგება მაღალი სიწმინდის კორუნდის აგურის ორი ფენისაგან. აგურების ურთიერთდამაკავშირებელ და შემკვერელ მასალად გამოყენებულია მულიტი. ასეთი ამონაგი ძალიან მკვრივია, კარგად უძლებს თბოცვლათა დიდ რაოდენობას და სტრუქტურულ ცვლილებებს. ინდუქტორისკენ მიქცეული მხარე ამოიგება თიხამიწის აგურით, ხოლო შიდა ფენა – ან მაგნეზიტის დიდი სისუფთავის აგურით ან კორუნდის აგურით, მათ შემკვერულად იყენებენ მაღალი სისუფთავის შპინელს.

7.4.1.4. ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში დნობის ტექნოლოგია

ნებისმიერი შენადნობის ან ფოლადი დნობისას ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელში საჭიროა ზუსტად ვიცოდეთ დნობის მიზანი. იმისდა მიხედვით, თუ რა დანიშნულება ენიჭება გამოდნობილ შენადნობს, საჭიროა დავადგინოთ ტექნოლოგიური პროცესების ესა თუ ის მიმდევრობა. ამასთან აუცილებელია, გამოყენებული საკაზმე მასალების ხარისხისა და სადნობი დანადგარების შესაძლებლობების გათვალისწინება. ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში მიმდინარე მთელი დნობა შეიძლება დაიყოს შემდეგ პერიოდებად: 1) ტიგელის ჩატვირთვა; 2) ღუმელის ამოტუმბვა სამუშაო წნევამდე, თუ ღუმელი პერიოდული მოქმედებისაა ან თუ მიდის პირველი დნობა ნახევრად წყვეტილი მოქმედების ღუმელში; 3) კაზმის ძირითადი ნაწილის გადნობა და მალეგირებლების დამატებითი ულუფის ჩატვირთვა; 4) თხევადი ლითონის დახალასება; 5) ლითონის სასურველ ქიმიურ შედგენილობამდე მიყვანა და განჟანგვა; 6) ჩამოსხმა.

0,5 ტ-იანი ღუმელში დნობის ხანგრძლივობა პერიოდების მიხედვით და მთლიანად შემდეგია:

ამოტუმბვა	8 წთ
ჩატვირთვა	5 წთ
გადნობა	153 წთ
დახალასება	37 წთ
გამოშვება	4 წთ
ტიგელის გასუფთავება	2 წთ
სულ	209 წთ ანუ ~3,5 სთ.

ღუმელის ჩატვირთვა. დიდი ღუმელები განსაკუთრებით მომზადებული კაზმით იტვირთება რამდენიმე ჩატვირთვით. საუკეთესო კაზმად ითვლება მსხვილი ზომის ნამზადები ან საგლინავე წარმოების ნარჩენები, საკუთარი ჩამოსხმის ნარჩენები.

ჩატვირთვის წინ კაზმის ამუშავებენ საფანტ-ჭაველური გასუყვითა-
ვებით, რათა მისი ზედაპირიდან ჟანგი მოაცილონ. ჩასატვირთ
კალათში კაზმის ჩაწყობას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება. კალათის
ძირზე აწყობენ წვრილი კაზმის ნაწილს, შემდეგ კი მსხვილი
კაზმის ნაჭრებს. ეს იმიტომ ხდება, რომ წვრილმა კაზმმა დაი-
ფაროს ტიგელის ძირი დიდი ნაჭრების დარტყმისაგან: კაზმს სე-
უნდა ჩალაგდეს კალათში და შემდეგ განაწილდეს ტიგელში.
რომ დნობის დროს არ წარმოიქმნას ე.წ. ხიდები. გამოსაყვანებელი
ფეროშენადნობები უნდა გამოიწვას, რათა მოშორდეს ადსორბი-
რებული აირი და ტენი.

გადნობა. ნახევრად წყვეტილად მოქმედი ღუმელის ჩატვირთ-
ვის შემდეგ ჩაირთვება დენი და გადნობა მიდის მთელ სიმძლავრის
გამოყენებით. პერიოდულად მოქმედი ღუმელი ჩატვირთვის შემდეგ
იკეტება და ამოიტუმბება. დენის ჩართვა შეიძლება მხოლოდ
წნევის რამდენიმე მმ Hg-ით დაცემის შემდეგ. კაზმის გახურებისას
წნევა ღუმელში ეცემა სამუშაო წნევამდე. იმ ფოლადების და
შენადნობების ნარჩენების გადადნობისას, რომლებიც ნახშირბადს
შეიცავენ, საჭიროა ვუფრთხილდეთ აირების მძლავრ გამოყოფას
ლითონიდან მისი დნობისას. სწრაფი დნობა დაბალი წნევისას
იწვევს ლითონის დუღილს, მის ამოფრქვევას ტიგელიდან და
ტიგელის ზედა ნაწილში ძნელად გასადნობი „საყვლოების“ წარმო-
ქმნას, რომლებიც ძნელდებენ ლითონის ზედაპირისკენ მიდგომას.
ძნელდება მასალების ჩატვირთვა, წესიერი ჩამოსხმა და ა.შ. თუ
ლითონი ვაკუუმში ძალიან დუღს, საჭიროა სიმძლავრის შემცირება;
მცირე ზომის ღუმელებში უშვებენ არგონს. ბოლო ხანებში დიდი
ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელები მუშაობენ თხევად ჯართზე.
ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში გადნობის პერიოდი იკავებს
მთელი დნობის 50-60 %-ს, ამიტომ მყარი ჯართის მაგიერ თხევადი
ლითონის გამოყენება საგრძნობლად ზრდის ღუმელების მუშაობის
ეფექტურობას. თხევად კაზმად შეიძლება გამოყენებული იქნეს
ნებისმიერ ფოლადსადნობ აგრეგატში გამოდნობილი ლითონი.

თხევადი ლითონის დახალასება. ლითონის გადნობის შემდეგ
უნდა ჩატარდეს საჭირო ტექნოლოგიური ოპერაციები, ლითონში
გახსნილი აირების, ნახშირბადის, აქროლადი ელემენტების
მინარეგებისა და გოგირდის, მოსაშორებლად. დაყოვნების ბოლოს
ამატებენ მალეგირებლებს და ლითონს საბოლოოდ განუანგავენ
ლითონური განმუანგველებით.

ვაკუუმში ლითონის დაყოვნებისას წნევა ღუმელში თანდათან
მცირდება მინიმუმამდე. ვაკუუმში თხევადი ლითონის დაყოვნების
ხანგრძლივობა დამოკიდებულია შენადნობის შედგენილობაზე.

ვაკუუმის სიდიდესა და ტექნოლოგიურ პროცესზე. ერთის მხრივ, ხანგრძლივი დაყოვნება ხელს უწყობს წყალბადის, აზოტის და აქროლადი კომპონენტების მოშორებას. მეორეს მხრივ, ლითონის ტიგელთან ურთიერთქმედებას მიეყვარო შენადნობის გაჭუჭყიანებისაკენ ჟანგბადით, ეგზოგენური არალითონური ჩანართებით, Al-ით, Si-ით, B-ით, რომლებიც აღდგება ტიგელის ამონაგადან.

მაღლეგრებლების და განშუანგველების მიცემისას ფროთხილად უნდა ეიყოს, რადგან ფეროშენადნობის ნაჭრის ან სუფთა ლითონის თხევად შენადნობში მოხვედრისას იწყება ლითონის მძლავრი დუღილი და აირების გამოყოფა დანამატებიდან. განსაკუთრებით ფროთხილად უნდა მიეცეთ ის მასალები, რომლებიც შეიცავენ ნახშირბადს. თუ ლითონი, მათი მიცემის დროისთვის კარგად არ არის განჟანგული, იწყება მძლავრი დუღილი. Al, Ti, Mo, V მიცემა მიმდინარეობს წყნარად.

დიდი მნიშვნელობა აქვს ტემპერატურული რეჟიმის შერჩევასაც. ტემპერატურის მომატება ხელს უწყობს წყალბადისა და აზოტის გამოყოფას და აორთქლებას, მაგრამ მიეყვარო ტიგელის ძლიერ დაზიანებამდე. დეგაზაციისათვის საკმარისია ლიკვიდულის ზევით 50-100 °C-ით გადახურება.

განჟანგვა. ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელში ლითონის განჟანგვა ხდება კაზმში შემავალი ნახშირბადით. უნახშირბადო შენადნობის გამოდნობისას (ნიკელის ან კობალტის ფუძიანი შენადნობები) მათი ნახშირბადით განჟანგვისათვის ლითონში დნობის დაწყებამდე ან ვაკუუმის პირობებში აძლიერენ გრაფიტს. თუჯს, ნახშირბადიან ფეროშენადნობებს და სხვ. ნახშირბადის შემცველი ფოლადის განსაკუთრებით მკვეთრი განჟანგვა მიდის დნობის პირველ პერიოდში, ლითონის მყარი მდგომარეობიდან თხევადში გადასვლისას, როცა ყველაზე კარგი პირობებია ბუშტების ჩასახვისათვის. მყარ-თხევად მდგომარეობაში ლითონის დუღილი მძლავრია. განჟანგვის პროცესის დამთავრება შეიტყობა ბუშტების გამოყოფის შეწყვეტით. ზოგიერთ შემთხვევაში ნახშირბადით განჟანგვა უკეთესია დავიწყოს Al-ით ნაწილობრივი განჟანგვის შემდეგ, ლითონის ტიგელიდან გადმოფრქვევის თავიდან ასაცილებლად.

წყალბადით ლითონის განჟანგვას მიმართავენ უნახშირბადო შენადნობების მისაღებად. წყალბადით განჟანგვის სინქარე ნაკლებია, ვიდრე ნახშირბადით. ამიტომ წყალბადით განჟანგვას მეტი დრო სჭირდება. წყალბადი შეიძლება მივაწოდოთ როგორც გამდნარი ლითონის ზედაპირზე, ასევე შეიუბეროთ იგი ლითონის სიღრმეში. ამ შემთხვევაში განჟანგვის პროცესის ხანგრძლივობა,

ჯანგბადის იგივე შემცველობის მისაღებად, რაც ლითონის ზედაპირის გაქრევისას მიიღება, მცირდება ~4ჯერ. წყალბადის, როგორც განმჟანგველის გამოყენება მოითხოვს უსაყრთხოების ტექნიკის მკაცრ დაცვას.

როგორც ზევით იყო ნათქვამი, ნახშირბადით ეერ მიიღწევა ჯანგბადის შემცველობის სასურველი შემცირება თხევად ლითონში. ამიტომ საჭირო ხდება ლითონური განმჟანგველის გამოყენება, რომელიც ლითონში შეჰყავთ ვაკუუმში დაყოვნების დამთავრებისას. ლითონურ განმჟანგველად გამოიყენება Al ან Al-ის Ce-სა, Ca-თან ერთად და Mg-ის ლიგატურას.

ლითონის განსაჯანგად შეიძლება გამოვიყენოთ ბუნებრივი ან სხვა ნახშირწყალბადების შემცველი აირი, რომლითაც შეიძლება როგორც თხევადი ლითონის ზედაპირის გაქრევა. ასევე მისი შებერვა ლითონის მოცულობაში.

განჯთავირდება. ლითონში გოგირდის შემცველობის შესამცირებლად აუცილებელია გამოვიყენოთ წიღები. ყველაზე კარგ შედეგს იძლევა შემდეგი შედგენილობის წიდა: 90 % CaO და 10 % CaF₂, პატარა მარცვლების (2-5 მმ) სახით, რომელსაც ტვირთავენ ტიგელის ძირზე კაზმის ქვეშ. წიდის უფრო წერილი მარცვლების გამოყენებას თითქოს უფრო უნდა გაეზარდა განჯთავირდების რეაქციის სინქარე, მაგრამ ამოტუმბვისას ეს მარცვლები მისდევს პაერის ჭაელს. გამოიღვენება ტიგელიდან და აფუჭებს ტემბოიებს. წიდის დიდი მარცვლების გამოყენება კი ამცირებს განჯთავირდების სარეაქციო ფართობს და ამით განჯთავირდების ხარისხი მცირდება. წიდის რაოდენობის გაზრდა 3 %-ის ზევით (წონითი % კაზმთან შეფარდებით) არ მოქმედებს განჯთავირდების ხარისხზე. ასევე არ მოქმედებს გოგირდის საწყისი შემცველობა ლითონში.

ლეგირება. ლეგირება ხდება თხევადი ლითონის დაყოვნების პერიოდში. მალეგირებლებისა და ძირითადი შემადგენლების მიცემის მიმდევრობის შერჩევა განსაზღვრავს შენადნობის ხარისხს. ცდებიდან ჩანს, რომ პირველად უნდა გადნეს შენადნობის ფუძე: რკინა, ნიკელი, კობალტი. ტიგელის ქველზე ან ჩასატვირთი კალათის ძირში დებენ W, FeSi, Mo. კაზმის გადნობისა და ლითონის განჯანგვის შემდეგ აძლევენ Cr, V-ს; შემდგომში მიეცემა Al, Ti, Mn. დნობის ბოლოს მიეცემა იშვიათ მიწათა ლითონები, Ca, Mg, B. მითითებული ელემენტების ნაადრევი მიცემას მიეყავართ ლითონის გაჭუჭყიანებამდე არაალითონური ჩანართებით - ჯანგმულებით ან ნიტრიდებით, რომლებიც დანამატების მიცემით წარმოიქმნება. რადგან არაალითონური ჩანართების ამოტივტივების პროცესი ნელია და ისინი ვერ ასწრებენ ლითონიდან ამოტივტივ-

ვებას, ამიტომ მალეგირებლების და განმჯანგველების გვიანი მიცემა არ უსრუნველყოფს ლითონის დახალასებას დანამატებში შემავალი მინარეკებისაგან. Mn შეჰყავთ ბოლოს, რათა აიცილონ თავიდან მის აორთქლებასთან დაკავშირებული დანაკარგი.

ლითონის ნამოსხმა. ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელში გამოდნობილ ლითონს ვაკუუმშივე ნამოსხამენ. ვაკუუმში ნამოსხმა შედარებით დაბალ ტემპერატურებზე მიმდინარეობს უფრო მეტი თხევადდენადობის გამო; ამასთან, სხმულები უფრო მკვირივი გამოდის. მაგრამ ზოგიერთ შემთხვევაში მალაღლებიერებული უჟანგავი ლითონების რთული მოყვანილობის სხმულების მისაღებად აუცილებელია სანამოსხმო კამერაში ინერტული აირის შეყვანა.

7.4.2. ვაკუუმურ-რკალური გადადნობა

ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების მოქმედების თავისებურება გამოიხატება იმაში, რომ ელექტროდი ან კაზმი დნება წყლით საცივებელ სპილენძის ტიგელში (კრისტალიზატორში) ელექტრული რკალის მოქმედებით; დნობა მიდის ვაკუუმში. წყლით საცივებელ სპილენძის ტიგელში ნამდნარი ლითონი გადმოსხმება ყალიბში ან ბოყეში ან დაკრისტალდება ტიგელში სხმულის სახით.

ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელებს შემდეგი ღირსებები აქვს:

1. თხევადი ლითონი ვაკუუმში ხალასდება აირებისა და სხვა ჭუჭყისაგან;

2. გამორიცხულია თხევადი ლითონის შეხება ცეცხლგამძლე მასალებთან, რაც უსრუნველყოფს საკმაოდ სუფთა ლითონის მიღებას;

3. სპილენძის წყლით საცივებელი კრისტალიზატორის გამოყენება საშუალებას იძლევა მივიღოთ მკვირივი სხმულები მკირე ნაჯდომის სიკარიღლით და ხელსაყრელად მიმართული სტრუქტურით;

4. შეიძლება გამოდნეს დიდი ზომის სხმულები. ამჟამად დნება 100-ტონიანი სხმული. გვემარდება ღუმელები 200 ტონამდე სხმულით. უარყოფითი მხარეებია:

1. ღუმელების უმრავლესობისათვის აუცილებელია საგანგებოდ მომზადებული კაზმი, ნაჭედი ან ნამოსხმული მრგვალი ან კვადრატული ელექტროდების სახით;

2. ლითონის ღებირება ძალიან შესდუღულია;

3. ვაკუუმურ-რკალური ღუმელები ძნელად გამოსაყენებელია მოყვანილი ნამოსხმისათვის.

ვაკუუმურ-რკალური ღუმელები იყოფა ორ ჯგუფად: სახარჯ-ელექტროდიანი და არასახარჯ-ელექტროდიანი.

ღუმელს არასახარჯი ელექტროდით აქვს მუდმივი ელექტროდი, მაგალითად, ვოლფრამის (წყლით საცივებელი) ან გრაფიტის. კაზმი მიეწოდება დნობის არეში ან ათავსებენ ელექტროდის ქვეშ ქვედაზე ან წყლით საცივებელ სპილენძის ტიგელში. მუდმივ ელექტროდსა და კაზმს შორის ინთება რკალი და ადნობს ლითონს. ასეთი ღუმელები ამჟამად გამოიყენება ლაბორატორიული სამუშაოებისათვის, რთული შედგენილობის შენადნობების გამოსადნობად და მათი თვისებების შესასწავლად.

სახარჯელექტროდებიან ღუმელებში დნება ჩვეულებრივ ფოლადსადნობ აგრეგატში წინასწარ გამოდნობილი ლითონისაგან დამზადებული ელექტროდი. ელექტრორკალის მეშვეობით თხევადი ლითონი თანდათან ჩაედინება ქვედიან კრისტალიზატორში და იყინება იქ სხმულის სახით.

ვაკუუმური რკალური ღუმელები სახარჯი ელექტროდით გამოიყენება ფოლადისა და სხვადასხვა ფუძეზე დამზადებული მხურვალმტკიცე შენადნობთა გადასადნობად და აგრეთვე სხმული W, Mo-ის და მათ შენადნობთა მისაღებად.

ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების განსაკუთრებულ სახეს წარმოადგენს გარნისაუული ღუმელები. სპილენძის წყლით საცივებელი ტიგელის გვერდებზე წარმოიქმნება მყარი გარნისაუი იმავე შედგენილობის გაუმდნარი ლითონისაგან, რომელსაც გაადნობენ. ეს ღუმელები გამოიყენება ძნელდნობადი ლითონებისა და მათ შენადნობთა სადნობად და ტიტანის მოყვანილი სხმულების ჩამოსხმისათვის.

რკალის ანთება ვაკუუმში. სანამ ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების მოწყობილობის განხილვაზე გადავიდოდეთ, საჭიროა მოკლედ მაინც გავეცნოთ ვაკუუმში რკალური განმუხტვის თავისებურებებს.

რკალურ განმუხტვაში, მყარ ელექტროდსა (კათოდი) და აბაზანის თხევად ლითონს (ანოდი) შორის შეიძლება გამოეყოთ რამდენიმე უბანი:

1. კათოდური ლაქა. კათოდური ლაქის მცირე ნაწილიდან ხდება თერმოელექტრონული ემისია. კათოდური ლაქის ტემპერატურა დამოკიდებულია კათოდის მასალაზე. ზოგი ცნობით ის შეადგენს რკინისათვის 2430 K, Ni-2370 K, W-3000-3640 K. სხვა მონაცემებით: ფოლადისათვის – 1993 K, Ti-2048 K, Mo-2948 K ლითონური ელექტროდზე ლაქა სულ მოძრაობაშია. ვარაუდობენ, რომ ის გადაინაცვლებს იმ ადგილებზე, სადაც ელექტრონების ამოვარდნაზე დახარჯული მუშაობა დაბალია. ეს ის ადგილებია, სადაც არის არალითონური ჩანართები, ჭუჭყი და სხვ. ლაქის

მცირე ზომებისას ლაქის ფართობის ერთეულზე გათვლილი დენის სიმკვრივე დიდია. კათოდურ ლაქაში გამოიყოფა დიდი სიმძლავრე.

2. რკალის სვეტის კათოდური უბანი. კათოდური უბნის სიგრძე განისაზღვრება ელექტრონების თავისუფალი განარბენის სიგრძით; რაც უფრო მცირეა წნევა, მით მეტია კათოდური უბანი. ამ უბანში ხდება პოტენციალის საგრძნობი ვარდნა – 18-18,5 ვ. ველის გრადიენტი აღწევს 10^5 - 10^7 ვ/სმ. კათოდურ უბანში ელექტრონები ღებულობენ დიდ ენერგიას და აიონიზებენ აირს. აირის დადებითი იონები ბომბავენ კათოდს და ამით ზრდიან მის ტემპერატურას. კათოდურ უბანში გამოიყოფა რკალის სიმძლავრის 60 %.

3. განმუხტვის დადებითი სვეტი. რკალის პლაზმის ამ უბანში, ტემპერატურით 8000-12000 °C, არ არსებობს სიერციითი მუხტი. ელექტრონების გადატანა ხდება ელექტრონებით. ატმოსფეროში განმუხტვასთან შედარებით, ვაკუუმში რკალი შეიძლება იყოს ძალიან გაჭიმული, დენის ძალის დიდი ვარდნის გარეშე და ძაბვის საგრძნობი მომატების გარეშე. ძაბვის მომატებისას რკალის სვეტი იკუმშება და გადადის აშევებულ განმუხტვაში, რომელიც ქაოსურად გადაადგილდება გამდნარი ლითონის ზედაპირზე. რკალის სვეტში პოტენციალის ვარდნა საგრძნობია 0,5-5 ვ. ძალიან მოკლე რკალის შემთხვევაში ელექტროდიდან ჩამოღვევითილი ლითონის წვეთები კრავს რკალურ მუქალედს, ხდება ჩართვა, ლითონის გაშხეფება, აბაზანა ცივდება, რადგან დენი გადის წვეთში და არა განმუხტვის სვეტში.

4. ანოდური უბანი. ანოდური პოტენციალის ვარდნის არე მეტია კათოდურისაზე. აქ ხდება პოტენციალის ვარდნა დაახლოებით 2 ვ-ით.

5. ანოდური ლაქა. ანოდური უბნის ლაქაში ხდება თხევადი აბაზანის დაბომბვა ელექტრონებით. შეჯახებისას ელექტრონები გადასცემენ ანოდს თავის ამოვარდნაზე დახარჯულ მუშაობას და იმ ენერგიას, რომელსაც ისინი იძენენ პოტენციალის გრადიენტის ვარდნის არის გავლისას. ანოდის ლაქის ფართობი შეესაბამება რკალის სვეტის განივკვეთს. წნევის შემცირებისას ანოდური ლაქა ვრცელდება მთელ აბაზანაზე, მისი ფართობი ძალიან იზრდება ჰაერზე რკალის ანთებასთან შედარებით, რასაც მივყავართ დენის სიმკვრივისა და ლაქის ტემპერატურის დაეარდნასთან. ზედაპირი, რომელზედაც ვრცელდება ანოდური ლაქა, ხურდება ზომიერ, თითქმის ლითონის დნობის ტემპერატურამდე, რადგან ანოდური ლაქის სითბო ვრცელდება აბაზანის მთელ ზედაპირზე.

თხევადი აბაზანის ტემპერატურა ვაკუუმურ-რკალური დნობისას ჩვეულებრივ ძალიან არ აღემატება აღებულ ლითონის

ლიკვიდუხის წერტილს. ლითონის ტემპერატურა მცირედ არის დამოკიდებული დენის ძალაზე. ანოდური ლაქის შუაში ტემპერატურა გაცილებით უფრო მეტია და ლითონის დუღილის ტემპერატურას აღემატება, რასაც მიეყვართ ლითონის ძლიერ აორთქლებამდე. ამიტომ წნევა აბაზანის ზედაპირზე გაცილებით მეტია, ვიდრე მთელ დანადგარში.

საერთოდ, ანოდურ უბანში გამოიყოფა რკალის სიმძლავრის 40 %. მიუხედავად რკალის სვეტის მაღალი ტემპერატურისა, მასში მოხუდრილი ლითონის წვეთი ვერ ასწრებს გადახურებას. რადგან რკალის სვეტს იგი გადის 0.05-0.1 წმ-ში. ლითონის გადნობაზე იხარჯება სითბოს 42 %.

7.4.2.1 ვაკუუმურ-რკალური ღუმელი სახარჯი ელექტროდით

ღუმელი შედგება პერმეტული კამერისგან. რომელსაც მიერთებული აქვს სპილენძის წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი. კრისტალიზატორის მიერთება ხდება მილტუჩის მიჭერით კამერასთან. შემჭიდროება ხორციელდება რეზინით ან ფტოროპლასტელინით. ღუმელის კამერას აქვს მიღებული ვაკუუმურ სისტემასთან მისაერთებლად. კამერის ზედა ნაწილში გაკეთებულია ჩობალის შემამჭიდროებელი, რომლიდანაც ღუმელში შედის ფოლადის წყლით საცივებელი შტანგა – ელექტროდის დამჭერი. გარდამავალი მომჭერის საშუალებით ელექტროდის დამჭერი მიერთებულია სახარჯ ელექტროდთან. კამერაში ჩაყოლებულია ფანჯრები დნობაზე უშუალო დაკვირვებისათვის და აგრეთვე პერისკოპული მოწყობილობა შორიდან დაკვირვებისათვის. მოქნილი კაბელების საშუალებით დენი მიიყვანება ელექტროდის დამჭერზე, ხოლო საღტეებით – კრისტალიზატორის მილტუჩასთან. დნობისათვის ელექტროდს ისე უშვებენ ქვემოთ. რომ შეეხოს კრისტალიზატორის ქვედს. პატარა ღუმელებში კრისტალიზატორის ქვედი შეიძლება იყოს ყრუც და გამჭოლიც. მეორე შემთხვევაში მას ძირიდან კეტავენ ქვეშით. კრისტალიზატორის ქვედზე ან ქვეშე დებენ საყელურ საფალიეს (აშნებს), რომელიც დამზადებულია იმავე მასალისაგან, რაც ელექტროდი; აგრეთვე, კარგი ელექტრული კონტაქტისათვის ყრიან ლითონის ბურბუშელას. დენის ჩართვის შემდეგ ელექტროდს მაღლა სწევენ. რითაც მასალასა და საყელურს შორის წარმოიქმნება რკალი. ლითონი დნება რკალის მიერ გამოყოფილი სითბოთი. ელექტროდის ქვედა ნაწილი მთლიანად იფარება 1-2 მმ სისქის გამდნარი ლითონით. ლითონის წვეთები ჩაიღვენთება კრისტალიზატორში და წარმოქ-

მნის თხევად აბაზანას. ამის შემდეგ რკალი იკვრება ელექტროდსა და დაგროვილ თხევად ლითონს (აბაზანას) შორის. ელექტროდის დნობასთან ერთად მას ნელ-ნელა სწევენ ქვევით. ე.ი. კრისტალიზატორში მუდამ ხდება ფოლადის სხმულის ზრდა. თხევადი ლითონის დეგაზაცია და დახალასება ხდება ელექტროდის ბოლოზე წვეთების ჩამოვარდნისას და თხევადი აბაზანიდან. მართალია, წნევა კამერაში დაბალია (10^3 - $5 \cdot 10^4$ მმ Hg), დნობის არეში რამდენჯერმე მეტია (10^1 - 10^3 მმ Hg). დნობის დამთავრების შემდეგ მოხსნიან კრისტალიზატორს ღუმელიდან. ან ამოაქვთ სხმული ქვეშის დაწვეით. ახალი ელექტროდის დაყენების შემდეგ ღუმელს ხურავენ, ამოტუმბავენ ჰაერს და იწყებენ მომდევნო დნობას.

განვიხილოთ ვაკუუმურ-რკალური ღუმელის ცალკეული კვანძების მოწყობილობა.

კრისტალიზატორი წარმოადგენს მრგვალ ან ოთხკუთხა წყლით საცივებელ მილს, 8 მმ-დან 20-30 მმ-მდე; მილის შიდა დიამეტრი სხმულის დიამეტრია. მილი ოდნავ კონუსურია და სხმულის ადვილად ამოღებისათვის ქვევით განიერდება. ამჟამად უფრო გავრცელებლია მრგვალი კრისტალიზატორები, თუმცა ოთხკუთხა სხმულების მიღება უფრო მიზანშეწონილია მისი შემდგომი გადამუშავების (გლინვა, ჭედვა) თვალსაზრისით და ვარგისი სხმულის გამოსავლიანობის გაზრდის მიზნით, რადგან ამ დროს კრისტალიზაციისათვის უფრო ხელსაყრელი პირობებია. ზედა ნაწილში მილი მიდუღებულია სპილენძის მრგვალ მილტუნასთან, რომლითაც კრისტალიზატორია მიერთებული ღუმელის კამერასთან. ქვევიდან მილი დახურულია სპილენძის წყლით საცივებელი ქვეშით. ღუმელთა ბევრ კონსტრუქციაში კრისტალიზატორი კი არ ეხსნება ღუმელის კამერას დნობის დამთავრების შემდეგ, არამედ ქვეში იწევა ქვევით სხმულთან ერთად. რომელიც გამოდის კრისტალიზატორიდან. ღუმელის ჩატვირთვისათვის ქვეშე ათავსებენ ელექტროდს, სწევენ ზევით, სანამ არ მიებჯინება კრისტალიზატორს. ელექტროდი შედის კრისტალიზატორში, შემდეგ კი მას მიუერთებენ ელექტროდის დამჭერს. სხვა შემთხვევებში სხმულიანი კრისტალიზატორი გადააქვთ განზე და მის ადგილას აყენებენ სხვა კრისტალიზატორს ახალი ელექტროდით. კრისტალიზატორი გარედან შემოსაღებულია ფოლადის გარსაცმით, რომელიც წყლით ცივდება. კრისტალიზატორი ცივდება წყლის იძულებითი დინებით, რომელიც რამდენიმე ატმოსფეროს წნევით შეიყვანება წყლის პერანგში.

ელექტროდის გადაამადგილებელი მექანიზმი. იგი შეიძლება იყოს მოქნილი ან ხისტი, გვარლებისა და ჯაჭვებისაგან გა-

კეთებულნი. მოქნილი საკიდარი გამოიყენება დიდ ვაკუუმურ ღუმელებზე, რომლებშიაც მძიმე ელექტროდები გამოდნება. მოქნილი საკიდრის გამოყენებისას მცირდება იმის საშიშროება. რომ დაზიანდეს ღუმელის ნაწილები ან თვით ელექტროდის გადამაადგილებელი მექანიზმი. პატარა ტევადობის ღუმელებში გამოიყენება ელექტროდის ხისტი იძულებითი მიწოდება. ელექტროდის დამჭერს აქვს ხრახინი. რომელზედაც ეჭირება ქანჩი. ქანჩი აიძულებს ელექტროდს აწარმოოს უკუქცევი-წინსვლითი მოძრაობა. ელექტროდის ამწე მექანიზმის ამძრავი შეიძლება იყოს როგორც ელექტრომექანიკური, ისე პიდრაელიკური. პიდრაელიკური ამძრავი უფრო მგრძობიარეა მუშაობაში, მაგრამ აქვს უარყოფითი მხარე: როცა ზეთი ცხელდება, იგი იცვლის თვისებებს და ამის გამო ირღვევა რეგულირების მუდმივობა.

ამჟამად გამოიყენება ელექტრომექანიკური ამძრავები დიფერენციალური რედუქტორით.

დენმიმყვანი. ვაკუუმური რკალური ღუმელები შეიძლება მუშაობდეს როგორც მუდმივ, ისე ცვლად დენზე. დადგენილია, რომ ღუმელთა მუდმივ დენზე მუშაობისას შესაძლებელია გამოვიყენოთ ამ დნობის ყველა დადებითი მხარე. ჩვეულებრივ, ელექტროდის დამჭერი მოქნილი კაბელითაა მიერთებული მუდმივი დენის წყაროს უარყოფით პოლუსთან. ხოლო კრისტალიზატორზე სალტეებით მიერთებულია დადებითი პოლუსები. ასეთ განლაგებას, როცა ელექტროდი კათოღია, შეესაბამება პირდაპირპოლარობა; პოლუსების მეორე განლაგებას – უკუპოლარობა. დენმიმყვანის სწორი განლაგება დიდ გაელენას ახდენს რკალის ანთებაზე.

თუ დენმიმყვანების სალტეები არასიმეტრიულად არის მიყვანილი სადნობი კამერის მილტუჩასთან, მაშინ კრისტალიზატორის ირგვლივ შექმნილი მაგნიტური ველი იქნება არასიმეტრიული. ეს არასიმეტრიულობა დამატებით კიდევ გაძლიერდება ღუმელის კონსტრუქციის ფერომაგნიტური მასების არახელსაყრელი განლაგებით.

არასიმეტრიული მაგნიტური ველის მოქმედებით რკალი გადაინაცვლებს კრისტალიზატორის კიდისკენ. წარმოიქმნება ელექტრული ველის დენის პორიზონტალურ მდგენელთან ურთიერთქმედების მბრუნავი მომენტი, რომელიც თხევად აბაზანას აბრუნებს პორიზონტალურ სიბრტყეში. ამასთან ხდება თხევადმყარი ფაზის (ორფაზა არის) გადაადგილება კრისტალიზაციის ზედაპირის მიმართ, ირღვევა ლითონში გახსნილი ელემენტების თანაბარი განაწილება და წარმოიქმნება მინარევებით გამდიდ-

რებული ან გადარიბებული უბნები, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ლიკვაცია.

როცა დენის სიმკვრივის ვერტიკალურ-მდგენელები სიმეტრიულადაა განაწილებული, ჯამური ძალა გადის კრისტალიზატორის ცენტრში და ლითონის ბრუნვა არ ხდება.

ამჟამად ცდილობენ ვაკუუმური რკალური ღუმელების ფოლადის კონსტრუქციები განალაგონ სიმეტრიულად კრისტალიზატორის მიმართ და შესაძლებლობის ფარგლებში დაამზადონ ისინი არამაგნიტური ფოლადისაგან.

მაგრამ აბაზანაზე გარე მაგნიტური ველის ზემოქმედების მთლიანი მოსპობა შეუძლებელია. საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ ის გარემოებაც, რომ გადასადნობი ელექტროდები დამაგნიტებულა და ისინი ზემოქმედებას ახდენენ აბაზანის ტრიალზე, თუმცა ელექტროდის დნობასთან ერთად მისი დამაგნიტება მცირდება.

აბაზანაზე მაგნიტური ველის ზემოქმედების თავიდან აცილების მიზნით იყენებენ გარე ხელოვნურ ველებს, რომლებსაც სოლენოიდები ქმნიან. სოლენოიდები დახვეულია კრისტალიზატორზე. სოლენოიდებში ატარებენ ისეთი ნიშნის და სიდიდის მუდმივ დენს, რომ სადნობ ზონაში მოქმედი მაგნიტური ველები მთლიანად იყოს გაწონასწორებული და მოისპოს აბაზანის ტრიალი.

ამჟამად სოლენოიდები ხშირად გამოიყენება თხევადი აბაზანის ტრიალის მოწესრიგებისათვის და რკალის სტაბილური ანთებისათვის. სოლენოიდის ველი უნდა ეთანადებოდეს რკალის დენს. როცა მცირე დენია, აბაზანა თავთხელია და მალე დაკრისტალდება. სოლენოიდის გამოყენება არღვევს კრისტალიზაციას, ამტერევს ჩასახულ კრისტალებს, სხმულის სტრუქტურაში ჩნდება უხეში არაერთგვაროვნება.

მაღალი დენის ძალისას თხევადი აბაზანა ღრმაა და მოდებული მაგნიტური ველი იწვევს სტრუქტურის დაწვრილმარკვლოვნებას.

სოლენოიდის გამოყენებას მიეყავართ არა მარტო რკალის წრიული ბრუნვისაკენ, არამედ ელექტროდის თანაბარი გადნობისაკენ. სოლენოიდის გამოყენება უჟანგავ შენადნობთა და ტიტანის დნობისას ასტაბილურებს რკალს. მცირე დენისას უსოლენოიდოდ დნობა არასტაბილურად მიმდინარეობს, კრისტალიზატორის კედლებს ეშხეფება ლითონი და სხმულის ზედაპირი გამოდის არადამაკმაყოფილებელი. სოლენოიდის ძალიან დიდი ველისას ლითონი ტიგელში ტრიალებს დიდი სიჩქარით,

წარმოიქმნება ე.წ. გვირგვინი და სხმულის ზედაპირი ფუჭდება. სოლენოიდის წესიერი ეელისას წარმოიქმნება წერილმარცვლოვანი სტრუქტურა და 25-80 %-ით იზრდება შენადნობის მექანიკური თვისებები.

მაღალნახშირბადიანი ფოლადების გადადნობისას სოლენოიდის გამოყენება არ აღმოჩნდა მიზანშეწონილი, რადგან წარმოიქმნება არაერთგვაროვანი კრისტალური სტრუქტურა.

კვების წყაროები. მუდმივი დენის ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების კვების წყაროებად გამოიყენება როგორც მანქანური გენერატორები, ასევე სელენის ან კაუბადიანი ნახევრგამტარული გამმართველები. კვების ამ წყაროებს უქმი სელის დენი აქვთ რამდენიმე ათას ამპერამდე, ხოლო ძაბვა — 85 ვ. მანქანურ გენერატორთან შედარებით ნახევრადგამტარული გამმართველები უფრო სანდოა, მოსახერხებელია, მცირე ზომისაა, იაფია. განსაკუთრებით მოსახერხებელია დიდი დანადგარებისათვის.

ელექტროდები. დნობისათვის შეიძლება გამოვიყენოთ მრგვალი ან კვადრატული განივეკეთის ელექტროდები. ელექტროდის დიამეტრი 50-140 მმ-ით უფრო ნაკლები უნდა იყოს კრისტალიზატორისაზე, რათა საკმარისი მანძილი დარჩეს ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის. თუ ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის მანძილი საკმაოდ მცირეა, მაშინ აბაზანაზე წნევა გაცილებით მეტი იქნება, ვიდრე სადნობ კამერაში, ამოტუმბვის სასურველი ფართობის შემცირების გამო. ამ დროს წარმოიქმნება მანე გვერდითი რკალები, რკალის თბური სიმძლავრის შემცირების გამო ლითონის ტემპერატურა დაეცემა, წარმოიქმნება ფუჟვადი განმუხტვა. ძალიან დიდი მანძილისას არასასურველად ნაწილდება სითბო: ელექტროდი ცუდად ფარავს აბაზანას და სითბო ზევით გამოსხივდება. ვაკუუმურ-რკალური დნობისთვის ელექტროდს ამზადებენ ჭედვით და მისი გვერდების შემდგომი დამუშავებით ჩარხებზე. ამ ტექნოლოგიის უარყოფითი მხარეა ნარჩენების დიდი რაოდენობა (50 %). უფრო ეკონომიურია სხმული ელექტროდები. სხმული ელექტროდების უარყოფითი მხარეებია: ჩაჯდომის ღრმა სიცარიელე; უხეში ზედაპირი, რომელიც მოითხოვს დამუშავებას; ძნელია გრძელი ელექტროოდების ჩამოსხმა. ამ მდგომარეობიდან გამოსვლა შეიძლება ელექტროდების ნახევრად უწყვეტ მანქანაზე ჩამოსხმით. ელექტროდი მაგრდება ელექტროდის დამჭერში გადაწყვანის მეშვეობით. გადაწყვანის ცალი მხრიდან აქვს ელექტროდის დამჭერის მისადაგი ბოლო, მეორე მხრიდან კი — ბრტყელი ბოლო, რომლითაც მიედულება ელექტროდს. დნობას ისე ამთავრებენ, რომ გადაწყვანზე დარჩეს

ელექტროდის მცირე ნაწილი – „ნამწვი“. მაგრამ იმდენი, რომ ზ. ედულოს ახალ ელექტროდს. ელექტროდის მიდუღება შეიძლება როგორც ღუმელში. ისე ღუმელის გარეთ. ელექტროდის ღუმელში შედუღება ამჟამად ძალზე გავრცელებულია. ეს შემდეგნაირად კეთდება: მისადუღებელ ელექტროდს ათავსებენ კრისტალიზატორში, ღუმელს ხურავენ და ამოტუმბავენ; ჩამოუშვებენ ელექტროდის დამჭერს „ნამწვით“, ანთებენ რკალს და წარმოქმნიან ელექტროდსა და „ნამწვს“ შორის მცირე თხევად ფაზას; ჩამოსწევენ ელექტროდის დამჭერის ბოლომდე და გამოროთავენ დენს; თხევადი ლითონი გამოიწნეხება ელექტროდსა და „ნამწვის“ ზედაპირიდან და შეადუღებს მათ.

ღუმელის გარეთ შედუღებისას ელექტროდს ათავსებენ სპეციალურ ბაქანზე; მის ბოლოს მოათავსებენ წყლით სავსე გარსაცმში, რომელშიც ყრიან საშემდუღებლო მდნობს, ზევიდან ადებენ „ნამწვს“ და ჩართავენ დენს. ელექტროდის დადუღება ღუმელის გარეთ საჭიროებს სპეციალურ ბაქანს. ამ ხერხს ის უპირატესობა აქვს, რომ მცირდება დრო ღუმელში ელექტროდის შედუღებაზე, შედუღება უფრო ხარისხიანია.

7.4.2. ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების რეგულირება

ვაკუუმურ-რკალური ღუმელის ავტომატური რეგულირება მიზნად ისახავს რკალის მოცემული სიგრძის მუდმივობის შენარჩუნებას. ელექტროდი მიეწოდება გარკვეული სიჩქარით, რომელიც დამოკიდებულია მისი დნობის სიჩქარეზე. რკალის სიგრძის შეცვლა ჩვეულებრივ დამოკიდებულია დენისა და ძაბვის ცვლილებაზე, რაც გავლენას ახდენს კრისტალიზაციის პროცესზე. თუ რკალი მოკლეა, ადგილი აქვს დენის ნახტომებს, ხოლო თუ გრძელია, იგი შეიძლება გადავიდეს კრისტალიზატორის კედელზე. ელექტროდის ნელი მიწოდებისას რკალი ზედმეტად გრძელი ხდება. დიდი სისწრაფით მიწოდებისას ხდება მოკლე ჩართვა. ელექტროდი შეიძლება მიედუღოს სხმულს. რეგულატორმა სწრაფად უნდა მოსპოს მოკლე ჩართვები, რომ არ გადატვირთოს დენის წყარო. დაამყაროს საჭირო დამოკიდებულება რკალზე მიწოდებულ სიმძლავრესა და დნობაზე დახარჯულ სითბოს, რკალის გამოსხივებას, თბურ დანაკარგებს და ა.შ. შორის. ელექტრული რეჟიმის რეგულირებისას საჭიროა გავითვალისწინოთ, რომ სხმულის ჩამოყალიბება ქვეშთან, კრისტალიზატორის შუა და ზედა ნაწილებში სხვადასხვაა, დნობის და ამ უბნებში ლითონის კრისტალიზაციის თბური პირობების განსხვავების გამო.

ვაკუუმურ-რკალურ დუმელში დნობის რეგულირების ძირითადი სიმნელეა რეგულირების ისეთი პარამეტრების არჩევა, რომლებითაც შესაძლებელი იქნებოდა დნობისას ყველა შესაძლებელი მოვლენის გათვალისწინება.

ყველაზე გამოსაყენებელ პარამეტრს წარმოადგენს რკალში ძაბვის ვარდნა, მაგრამ საჭიროა იმის გათვალისწინება, რომ ძაბვა დაბალი წნევისას დამოკიდებულია არა მარტო რკალის სიგრძეზე, არამედ ლითონის ორთქლის არსებობაზე, წნევაზე, მაგნიტური ველის არსებობაზე და სხვ. რკალის პოტენციალის გრადიენტი ტოლია $0,3-0,6$ ვ/სმ-ისა. საჭიროა ძაბვის სტაბილიზაცია $\pm 0,2-0,3$ ვ სიზუსტით, რაც რკალის სიგრძის მუდმივობას უზრუნველყოფს $0,7-3,0$ სმ-ის ინტერვალში $0,5$ სმ-ის სიზუსტით.

ძაბვის ვარდნაზე მომუშავე რეგულატორი უნდა ითვალისწინებდეს, რომ რკალის დიდი სიგრძის ან დენის მცირე ძალის პირობებში რკალში ხდება ორთქლის გაიშვიათება და რკალის სიგრძესა და ძაბვას შორის შეფარდება გადაიხრება ნორმალურისაგან. ამ მოვლენის თავიდან აცილებისათვის საჭიროა არანაკლებ 5 კა დენზე მუშაობა და მაღალმგრძობიარე სქემის გამოყენება. დნობისას აირის უეცარ გამოყოფას მიეყაერთ ფუჟვადი განმუხტვის წარმოქმნისაკენ. ამ დროს ხდება ძაბვის ვარდნა და რეგულატორი აგრძელებს რკალის განმუხტვას სტაბილიზაციის გარეშე.

რეგულირების გამუჯობებისათვის სქემაში შეტანილია აირის რელე. რკალში ძალიან დაბალი ძაბვისას ან ძაბვის ძალიან სწრაფი ვარდნისას ფუჟვადი განმუხტვის დროს ჩვეულებრივი რეგულატორი გამოირთვება, ხოლო აირის რელე ელექტროდის მდებარეობას ასტაბილურებს – არ რთავს ელექტროდის დამწვე მექანიზმს, სანამ არ შეწყდება განმუხტვა.

კარგი სტრუქტურის სხმულის მისაღებად საჭიროა დნობის წაყვანა დენის მუდმივი ძალით, რომლის ნორმალურიდან მცირე გადახრების დროსაც კი ($1,5-2,0\%$) 1-2 წამის განმავლობაში წარმოიქმნება კრისტალური სტრუქტურის არაერთგვაროვანი უბნები – ნათელი ძაფები.

დენის არასტაბილურობა შეიძლება გამოიწვიოს: რკალის სიგრძის შეცვლამ; მოკლე ჩართებებმა; იონიზაციის მოვლენამ, რკალის გადასროლამ კრისტალიზატორის კედელზე. რკალის სიგრძე იცვლება ელექტროდიდან ლითონის წვეთების ჩამოდინებისას. კვების წყაროში წარმოიქმნება დენის სხვადასხვა ხანგრძლივობის იმპულსები. რაც უფრო მცირეა რკალის სიგრძე. მით მეტია რკალის ჩაქრობა-ანთების იმპულსების სიხშირე.

ლითონის წვეთების მიერ რკალის უფრო ხშირი გადაკვეთის გამო. დენის ნახტომი ხშირად იქმნება ძალიან გაჭუჭყიანებული ლითონის დნობისას. რაც უფრო დიდია ვაკუუმის ვარდნა ღუმელში, მით მეტია დენის ნახტომის ამპლიტუდა და მით უფრო ხანგრძლივია იგი. ამასთან, ეცემა ლითონის ტემპერატურა, ხოლო დნობის სინქარე მცირდება.

დენის ძალის შერჩევა

ელექტროდის დნობის სინქარე დამოკიდებულია დენის ძალაზე. ეს დამოკიდებულება საერთო სახით უნდა გამოისახებოდეს ტოლობით:

$$A=k(I-I_0)$$

სადაც k მუდმივი კოეფიციენტია (კგ/ა.წმ);

I_0 —ელექტროდის თბური დანაკარგებზე დახარჯული სიმძლავრის განმსაზღვრელი დენის ძალაა (კა);

რადგანაც I_0 -ის სიდიდე მცირეა წარმოების პირობებში გამოყენებულ I -თან შედარებით, ამიტომ შეიძლება ვისარგებლოთ ფორმულით $A=kI$, სადაც I არის დენის ძალა, კა. კოეფიციენტი $k=0,5-0,7$ დამოკიდებულია ფოლადის შედგენილობაზე 25 ვ ძაბვისას.

I -ს დაბალი მნიშვნელობისათვის ან ძნელდნობადი ლითონების (Mo, W) გადადნობისას უკეთესია პირველი ტოლობა. დნობის სინქარე არ არის დამოკიდებული ელექტროდის და კრისტალიზატორის ზომებზე, ის განისაზღვრება მარტო დენის ძალით.

დენის ძალის გაზრდისას სხმულის კრისტალური სტრუქტურა თითქმის ყოველთვის უახლოვდება იმ სტრუქტურას, რომელსაც ველუბულობთ თუჯისაგან დამზადებულ ბოყვებში ჩვეულებრივი ჩამოსხმისას. იმ შენადნობებს, რომლებიც ძნელად დეფორმირდებიან, ამისთანა სტრუქტურის პირობებში უუარესდებათ დეფორმაციის უნარი ჭედვისას.

ჩვეულებრივ, შედარების პარამეტრად იღებენ დენის ხაზოვან სიმკვრივეს — 1 ამპერი კრისტალიზატორის დიამეტრის 1 სმ-ზე. მას იღებენ 120-220 ა/სმ-ის დონეზე. დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისა და შენადნობებისათვის დენის უკეთესი სიმკვრივეა 100-330 ა/სმ 300 მმ-ნი კრისტალიზატორისათვის.

ხარისხიანი სხმულის მისაღებად საჭირო დენის ძალა იანგარიშება ფორმულით

$$I_k = \beta D.$$

I_k სამუშაო რეჟიმის დენის ძალაა, ა;

D კრისტალიზატორის დიამეტრია, სმ;

ბ კოეფიციენტი, 170-400 ა/სმ.

საშუალო და მაღალნახშირბადიანი ფოლადების გადადნობისას, როცა ისინი არ შეიცავენ აორთქლებად ელემენტებს, ხოლო დეგაზაცია უზრუნველყოფილია ნახშირბადის ხარჯზე, დენის ძალის გაზრდას მიეყვართ კარგ შედეგებამდე. თუკი გეინდა მივიღოთ სხმული სვეტისმაგვარი კრისტალების შემცირებელი ზონით, აუცილებელია დენის ძალის შემცირება. ძლიერი ადუღების გამო არ შეიძლება დენის ძალის გაზრდა სუსტად განუანგული ლითონის დნობისას ზოდში ბზარების შესაძლო გაჩენის გამო, ასევე არასასურველია დიდი დენის ძალა იმ შენადნობების გადასადნობად, რომლებიც რთულ ფაზურ გარდაქმნებს განიცდის. დენის ძალის დიდი შემცირებაც არ ვარგა. რადგან (კუდად მოქმედებს სხმულის ზედაპირის ხარისხზე. ამ დროს ვერ ასწრებს გადნობას კრისტალიზატორის კედლებზე შექმნილი გვირგვინი (გვირგვინი ეწოდება კრისტალიზატორის კედლების დამფარავ ფენას, რომელიც წარმოიშობა ლითონის გაცივებული შხეფებისაგან და ლითონური ორთქლის კონდენსირებით).

დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სხმულის გამოდნობისას ჩაჯდომის სიცარიელის გამოყვანის ბოლო პერიოდს. რადგან ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელებში ადნობენ ძვირად ღირებულ ლითონს, ამიტომ ნარჩენების შემცირება სხმულის თავის ჩამონატრების შემცირებით საგრძნობლად ამცირებს ფოლადის თვითღირებულებას. ჩაჯდომის სიცარიელის გამოყვანის ყველაზე კარგ ხერხს წარმოადგენს დენის ძალის შემცირება სამუშაოდან უმცირესამდე, რომლის დროსაც რკალი ანთია 30-60 წუთის განმავლობაში სხმულის ზომაზე დამოკიდებულებით. დენის ძალის ასეთი თანდათანობითი შემცირებით ჩაჯდომის სიცარიელე საგრძნობლად მცირდება, ზედა ნაწილს სასურველი მაკროსტრუქტურა აქვს, ხდება ლითონის გასუფთავება აირებისაგან, არალითონური და მანეე მინარეეების ჩანართებისაგან, თხევადი ლითონის მოცულობის ნელი შემცირების გამო.

7.4.2.3. ვაკუუმური სამფაზა რკალური ღუმელები

დიდი სხმულების გამოდნობისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება დენის ძალის თანაბარ განაწილებას აბაზანაში 600-750 მმ სიღრმეზე. თუ არ არის დენის ძალის თანაბარი განაწილება, აბაზანაში წარმოიქმნება ცივი უბნები, რომლებიც შეიძლება დაკრისტალდეს კიდეც. დამოუკიდებელი კვების მქონე სამი ელექტროდის გამოყენება შესაძლებელს ხდის უფრო

თანაბრად განაწილდეს აბაზანაზე დენის ძალა. ამასთან, შესაძლებელია სამფაზა დენის გამოყენება. ამ ღუმელების უპირატესობაა დნობის სიჩქარის სამჯერ გაზრდა ჩვეულებრივ ღუმელთან შედარებით. სხმული გამოდის ერთგვაროვანი, კარგი ზედაპირით. გამოდნობის შემდეგ მექანიკური დამუშავებისას ლითონი ამუღანებს კარგ პლასტიკურ თვისებებს, კარგ სისუფთავეს არალითონური ჩანართების მხრივ, არა აქვს ლაქისებრი ლიკვაცია.

იმის გამო, რომ სამფაზა ღუმელში დენი სხვადასხვა მიმართულებით გადის ერთმანეთის მახლობლად განლაგებულ სამ ელექტროდში, მაგნიტური ველები ერთმანეთს აბათილებენ, დენი არც კრისტალიზატორში გადის, მოხსნილია მაგნიტური ველის გავლენა თხევად ლითონზე და მის ბრუნვაზე, ხოლო აბაზანის არევა წარმოებს თხევადი ლითონის დიდი ნაკადის შედეგად.

რკალის წვის სტაბილიზაციისათვის აბაზანის ზედაპირზე მოაბნევენ კალიუმის ქლორიდის გუნდებს.

7.4.2.4. ვაკუუმურ-რკალური გარნისაყული ღუმელი

ეს ღუმელები, ჩვეულებრივი ვაკუუმურ-რკალური ღუმელებისაგან განსხვავებით, საშუალებას იძლევა ვაწარმოოთ ლეგირება გადადნობისას. გარდა ამისა, გარნისაყული ღუმელი შეიძლება გამოვიყენოთ ძნელდნობადი ლითონებისა და მათი შენადნობებისაგან რთული ფორმების სხეულების მისაღებად.

გარედან წყლით საცივებელი ტიგელი შეიძლება იყოს გრაფიტის ან ლითონური (სპილენძის ან უფანგავი ფოლადის). დნობის დროს ტიგელის შიდა კედელზე წარმოიქმნება გაუმდნარი მყარი ლითონის სქელი ფენა – გარნისაყი. მის შიგნით ჩადნება ლითონი. ლითონის ტიგელს ის უპირატესობა აქვს გრაფიტის ტიგელთან შედარებით, რომ ის არ ურთიერთქმედებს გარნისაყთან. უარყოფითი მხარე ლითონური გარნისაყისა ის არის, რომ შეიძლება ის გადნეს რკალით და მოხდეს აფეთქება. ლითონი ჩამოისხმება ან ტიგელის ძირიდან, ან მისი გადაყირავებით. დენი მიიყვანება ან ქვევიდან ტიგელის ქვედის ცენტრის გავლით, ან პოტოჯიკით. ვაკუუმურ-რკალური გარნისაყული ღუმელები მუშაობენ სახარჯი ან არასახარჯი ელექტროდებით.

7.4.2.5. სხმულის კრისტალიზაცია ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელში

ქვეშე თხევადი ლითონის მოხვედრისა და დნობის პროცესის სამუშაო რეჟიმზე გადასვლის შემდეგ იწყება სხმულის ჩამოყალიბება. სხმულის გარკვეულ სიმაღლემდე აბაზანის სიღრმე ჯერ იზრდება, შემდეგ კი მუდმივი რჩება.

თხევადი აბაზანის ფორმა უახლოვდება პარაბოლოიდისას. აბაზანის სიღრმე ინგარისშეჭყ ფორმულით:

$$h_{\text{გაქს}} = \frac{D^2}{4};$$

სადაც V აბაზანის მოცულობაა;

h – უდიდესი სიღრმე;

D – სხმულის დიამეტრი.

აბაზანის სიღრმე განისაზღვრება დენის ძალით და ელექტროდისა და კრისტალიზატორის დიამეტრების შეფარდებით.

$$H_{\text{გაქს}} = 3,58I, \text{ სმ.}$$

ან შეფარდების მიხედვით

$$h = K_1 \frac{D_1}{D_2} (1-\alpha)^{\beta} \cdot \text{მმ,}$$

სადაც D_1 და D_2 ელექტროდის და სხმულის დიამეტრებია, მმ;

I – შაკისმალურად შესაძლებელი დენის ძალა, კა;

K_1 და α შესაბამისადაა 145 და 0,6.

აბაზანის სიღრმის ანგარიში შეიძლება კიდევ ასე:

a – სამუშაო (რეალური) დენის ძალაა.

$$h = K_1 \cdot I^{\alpha} \cdot D^{\beta}, \text{ დმ.}$$

სადაც I დენის ძალაა, კა;

D სხმულის დიამეტრია, დმ;

K_1 , α , β , – კოეფიციენტები. იცვლებიან ფოლადის შედგენილობის მიხედვით შემდეგ ზღვრებში: $0,1 < K < 0,45$; $1,1 < \alpha < 0,2$; $0,8 < \beta < 0$.

დნობის დასაწყისში, როცა აბაზანის სიღრმე მცირეა, კრისტალიზაცია ქვეშის პარალელურია. შედარებით მალე, როცა კრისტალიზაციის ყველაზე ღრმა ადგილი ქვეშიდან სხმულის დიამეტრის 0,5-0,75 მანძილზე გადაინაცვლებს, იქმნება კრისტალიზაციის წონასწორული პირობები: სხმულის ზედაპირზე წარმოიქმნება წერილი კრისტალების თხელი ფენა, რომელთაც უერთდება ორიენტირებული სვეტისებრი დენდრიტების ფენა. სხმულის ძირზე ისინი მიმართულია სხმულის ზედაპირის მართობულად, ზემოთ – დახრილად. კრისტალების მიმართულება განისაზღვრება ტემპერატურული გრადიენტით.

თუჯის ბოყეებში ჩამოსხმული სხმულებისაგან განსხვავებით, ვაკუუმურ-რკალურ სხმულში არ წარმოიქმნება სხვადასხვა ორი-

ენტაციის კრისტალები და გლობულარული კრისტალების კონუსი სხმულის ძირზე. მხოლოდ სხმულის ზედა ნაწილში, როცა ამცირებენ დენის ძალას ჩაჯდომის სიცარიელის გამოსაყვანად, ჩნდება გლობულარული კრისტალების და არაორიენტირებული დენდრიტების ზონა. მხოლოდ დენის დიდი ძალის შემთხვევაში, როცა მკვეთრად იზრდება აბაზანის სიღრმე, სხმულის შუა ნაწილში ჩნდება არაორიენტირებული კრისტალების ზონა.

ორიენტირებული კრისტალიზაციის უარყოფითობა გამოიხატება იმაში, რომ ზრდადი კრისტალების წინ მოძრაობს დედახსნარის აფსკი, რომელიც გამდიდრებულია მინარევებით. აბაზანის უცბადი მაგარი არევით. მაგალითად, დენის ბიძგებისას, ან ამ უბანში აირების გამოყოფით. ყალიბდება სხვადასხვა ორიენტაციის კრისტალები, რაც ხელს უშლის ორიენტირებული კრისტალების ზრდას. განივ შლიფზე მუდამ ჩანს ლიკვატების რგოლი, ფოლადის ყველა ლიკვაციური ელემენტის გაზრდილი შემცველობით. ლიკვაციური არეების წარმოშობასთან ერთად ჩნდება ზონები ლიკვაციური ელემენტების შემცირებული შემცველობით, ღია რგოლების სახით.

დნობის დასაწყისში კრისტალიზაციის სიჩქარე ნაკლებია დნობის სიჩქარეზე, დნობის ბოლოს – მეტი. კრისტალიზაციის საშუალო სიჩქარე შეიძლება ნაწილობრივ ეთანადებოდეს დნობის სიჩქარეს. ზოგი მეცნიერის აზრით $E=0,835A$, კგ/წთ, სადაც I კრისტალიზაციის მასობრივი (მასის მიხედვით) სიჩქარეა, A – დნობის სიჩქარე.

კრისტალიზაციის ხაზოვანი სიჩქარე V_E პროპორციულია კრისტალიზაციის მასობრივი სიჩქარის შეფარდებისა აბაზანის ზედაპირთან (რომელსაც პარაბოლიდის ფორმა აქვს).

$$V_E = 6,2 \cdot \frac{F}{F} \text{ სმ/სთ.}$$

$$V_E = 2970 \left(\frac{KI}{D^2 \pi \gamma} \right)^{0,57} \text{ სმ/სთ.},$$

სადაც K დნობის კუთრი სიჩქარეა, კგ/(კა·წთ), I დენის ძალა, კა, D კრისტალიზატორის დიამეტრია სმ. γ მყარი ლითონის სიმკვრივეა გ/სმ³.

კრისტალიზაციის ხაზობრივი სიჩქარეა 18-48 სმ/სთ. ის იზრდება დენის ძალასთან ერთად, მაგრამ არაპირდაპირი დამოკიდებულებით, რადგან დენის ძალის გაზრდასთან ერთად იზრდება აბაზანის სიღრმე და გამყარება ნელდება. ამიტომ დიდ კრისტა-

ლიზატორებში კრისტალიზაციის ხაზობრივი სინქარე უფრო ნაკლებია, ვიდრე პატარა კრისტალიზატორებში.

თხევადი ლითონის დეგაზაციისათვის მნიშვნელობა აქვს მისი დაყოვნების ხანგრძლივობას, რომელიც დამოკიდებულია აბაზანის საშუალო სიღრმის შეფარდებაზე შევსების სინქარესთან.

$$\tau = 1.173 \left(h \cdot \frac{60}{VF} \right)^{0.29} \text{ წთ.}$$

სადაც h აბაზანის სიღრმეა, სმ;

F აბაზანის ზედაპირის ფართობია, სმ²;

V შევსების სინქარეა, სმ/სთ, იგი იანგარიშება უფორმულით

$$V = 4.8 \cdot N \cdot \frac{10^3}{\pi D^2 \gamma} \text{ სმ/სთ.}$$

N რკალის სიმძლავრეა, კვტ.

7.4.2.6. ლიკვაცია სხმულებში ვაკუუმ-რკალური გადადნობისას

ვაკუუმურ-რკალური გადადნობის ლიკვაციურ დეფექტებს შორის აღსანიშნავია გარედერძული არაერთგვაროვნება, ლაქისებრი ლიკვაცია, შრეობრივი კრისტალიზაცია.

ფოლადისა და სხვა შენადნობების დიდი ზომის სხმულებში გარედერძული ლიკვაცია გეხვდება გრძივ ტემპლეტებზე, წაგრძელებული ზოლებისა და წერტილების ან ლაქების სახით. წერტილები და ლაქები წრეების სახით მოთავსებულია განივი კვეთის ტემპლეტის დიამეტრის შუაში. ამ ზოლებსა და ზონარებში, რომლებიც განლაგდება სხმულის ზედა ნაწილში, გეხვდება ნიტრიდებისა და კარბონიტრიდების დაჯგუფებები, ჩაჯდომის ფორები ანუ სერეტები. ასეთი დეფექტები წარმოიქმნება დნობისას დენის დიდი ძალის, არასტაბილური ელექტრული რეჟიმის, გამყარების ზონაში ტემპერატურული გრადიენტის არასტაბილურობის არსებობისას.

ლაქისებრი ლიკვაცია მედენდება მაღალი მოწამელის უბნებით. გრძივ ტემპლეტებზე ჩანს ოდნავ წაგრძელებული ლაქები აბაზანის გარემოხაზულობის ორიენტაციით, განივზე კი გამოვლინდება მუქი ლაქები ან ტრადიციული ზოლები.

ლიკვაციას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს მაღალ-ლეგირებული ფოლადებისა და შენადნობებისათვის. რაც უფრო

მსხვილია სხმული, მით უფრო დიდია მისი ლიკვაციით დაზიანების ხარისხი, რომელიც იწარმოება დენის ძალისა და დნობის სიჩქარის მომატებასთან ერთად. მაგრამ დენის ძალისა და დნობის სიჩქარის შემცირება იწვევს ღუმელის წარმადობის დაწევას, ხოლო აბაზანის შეცივებით მის ზედაპირზე ჩნდება ღრმა წანაკეცები (ნაწიბურები).

სოლენოიდების გამოყენებამ გამოიწვია ლიკვაციური ლაქების წარმოშობა სხმულის მთელ კვეთში. აბაზანის ტრიალი იწვევს თხევადი და მყარი ფაზების განცალკევებას, წარმოიქმნება ელემენტების ლიკვაცია, რომელიც ამცირებს შენადნობის ლიკვიდუის (და სოლიდუის) ტემპერატურას. ლიკვაციური უბნები იღებენ სპირალის სახეს, რომელიც ლითონის მოცულობის გადაადგილების მიმართულებით გაიწელება.

ლიკვაციური ლაქების წარმოშობის მეორე მოსაზრება შემდეგში გამოიხატება: ლითონის კრისტალიზაციისას ხდება მინარევების გამოყოფა თხევად დედახსნარში. მასში მინარევების რაოდენობის გაზრდით და კრისტალიზაციის ხაზის (ფრონტის) წინსვლით თხევად ლითონში წარმოიქმნება აურეველი უხსნადი ფაზები. ახალ ფაზას უნდა აქონდეს უფრო ნაკლები სიმკვრივე, ვიდრე პირველადს. ის ამოტივტივდება და ტოვებს ღეროსმაგვარ კვალს. ეს კვალი მყარდება უფრო მოგვიანებით, ვიდრე ძირითადი დედახსნარი და ამიტომ იქმნება ლაქები.

შრეობრივი (ფენოვანი) კრისტალიზაცია ანუ „ნათელი ძაფები“ სუსტად მოწამლული ფენებია სხმულებში და დეფორმირებულ ლითონში. ნათელი ძაფები გრძივ ტემპლეტებზე ნაწილობრივ ან მთლიანად შემოწერენ აბაზანის გარემოხაზულობას. შესაძლებელია, რომ ძაფები მჭიდროდ განლაგებული მცირე დენდრიტების თხელი ფენაა.

7.4.2.7. ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელში დნობის პირობების გავლენა სხმულის ზედაპირის ხარისხზე

ჩვეულებრივ, ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელში გამოდნობილი სხმულის ზედაპირი უსწორმასწოროა. კრისტალიზატორის კედლებზე წარმოიქმნება „გვირგვინი“ კონდენსირებული ლითონის. მალეგირებლებისა და ლითონის შეფუებისაგან. გვირგვინთან შეხებისას თხევადი ლითონი წამოდუღდება. საერთოდ, მთელი გვირგვინი არ გადნება ლითონით. მისი გარკვეული ნაწილი მიედუღება სხმულის ზედაპირს. სხმულის ზედაპირზე წარმოიქმნება

უხეში ქერქი. ეს ქერქი აუცილებლად უნდა მოიხსნას ჩარხზე 5-10 მმ სიღრმეზე, ზედაპირის ხარისხის მიხედვით.

გვირგვინი შეიძლება მოწყდეს კიდევც კრისტალიზატორის კედელს თხევადი ლითონის მიახლოებისას. მაშინ მისი ნატეხები ცვივა აბაზანაში და ხდება სხმული სტრუქტურული ნაკლის წარმოქმნის მიზეზი.

რკალის სიგრძის გაზრდით გვირგვინი ხდება თხელი და მაღალი, მატულობს მისი გახურება; ხშირად სძერება კრისტალიზატორის კედელს და ხვდება თხევად ლითონში. რკალის ხელსაყრელი სიგრძე 25-30 მმ-ით განისაზღვრება. უფრო მოკლე რკალის პირობებში არის მოკლე ჩართვის საშიშროება. ასეთი რკალის მუშაობისას სხმულის ზედაპირი სწორია, წანაკეცები არ კეთდება, არ არის გვირგვინის შეუღლებელნაწილებიანი უბნები ძირითად ლითონზე.

კრისტალიზატორის შიდა კედელი უხეში უნდა იყოს, რათა გვირგვინი მასზე კარგად დამაგრდეს.

დენის ძალის გაზრდამ შეიძლება გააუმჯობესოს სხმულის ზედაპირის ხარისხი. ღრმა და ცხელი თხევადი აბაზანა ადნობს კრისტალიზატორის კედლებზე მყოფ გვირგვინს. უკეთესი ზედაპირი აქვთ კარგად განუანგულ სხმულებს, რადგან არ ხდება აბაზანის წამოდულება კრისტალიზატორის კედლებთან.

7.4.2.8. არალითონური ჩანართების მოშორება ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისას

ვაკუუმურ-რკალური გადადნობის ერთ-ერთ ძირითად უპირატესობას წარმოადგენს ლითონის გასუფთავება არალითონური ჩანართებისაგან. ჩანართების მოშორების ორი გზა არსებობს — ამოტივტივება თხევად აბაზანაში და ნახშირბადით აღდგენა.

ჩანართების ამოტივტივების უშუალოდ დამამტკიცებელი საბუთია ტუჭყიანი ელექტროდის გადადნობისას თხევადი აბაზანის ზედაპირზე წარმოქმნილი წილის შედგენილობა. აქ ჭარბობს ძნელად აღსადგენი ჟანგეულების Al_2O_3 , MgO , CaO -ს რაოდენობა. განსაკუთრებით კარგად სუფთავდება ლითონი დიდი არალითონური ჟანგეულებისაგან. გადამდნარ ლითონში ნაპოვნი არალითონური ჩანართების ზომები იყო 8 მკმ, როცა გადადნობამდე 70 მკმ-ს შეადგენდა. ცდებით და დაკვირვებებით დადგენილია, რომ 15 მკმ-ზე დიდ ჩანართები ასწრებენ ამოტივტივებას, რადგან

ამისთანა ჩანართების ამოტივტივების სინქარე უფრო დიდა, ვიდრე კრისტალიზაციის საზღვრის გადაადგილების სინქარე.

სხმულის ზედა ნაწილში არალითონური ჩანართების რაოდენობა უფრო მეტია, ვიდრე მის შუა ნაწილში. მაგალითად, თუ საშუალოდ სხმულში იყო 0.00082 %, ზედა ნაწილშია 0.0017 %, სხმულის შუა და ქვედა ნაწილში გლობულარული ჩანართები განაწილებულია თანასწორად, მაშინ როცა ზედა ნაწილში ისინი მეტია განაპირა ზონაში. ეს აიხსნება ლითონის შეცივებით სხმულის განაპირა უბნებში დნობის ბოლოს დენის ძალის შემცირების გამო.

საგრძობლად სუფთაედება ლითონი თიხამიწის მინარევებისაგან. ეს მინარევები ცუდად სველდება ლითონით და ამიტომ ასწრებს ამოტივტივებას თხევადი ლითონიდან მის გამყარებამდე.

ლითონის გაწმენდა ჟანგეული მინარევებისაგან ნახშირბადით აღდგენით შეიძლება მოხდეს უბრალო შედგენილობის იმ ფოლადების გადადნობისას, რომლებიც არაა განუანგული, ან განუანგულია კაუბადით. კაუბადით მდიდარი გლობულარული ჩანართების ნაწილი, რომლებიც კარგად სველდება ლითონით, ვერ ასწრებს ამოტივტივებას ან აღდგენას და რჩება სხმულის განაპირა ნაწილში. ქერქისქვეშა არეში ჩნდება ბუშტები, რომლებიც წარმოიქმნება თხევადი და მყარი ფაზების გასაყოფზე. სანამ ბუშტი გაიზრდებოდეს და ამოტივტივდებოდეს, მის ირგვლივ მყოფი ლითონი ასწრებს გამყარებას და ბუშტი რჩება ლითონში. CO-ს ბუშტები წარმოიქმნება კაუბადის ნახშირბადით აღდგენის შემთხვევაში, რადგან Al-ით განუანგულ ლითონში ბუშტები არ არის. ალბათ სჯობია ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისათვის ვიხმაროთ კარგად განუანგული ელექტროდები, რადგან წინააღმდეგ შემთხვევაში წარმოიქმნება დიდი რაოდენობის CO.

სხმულის ცენტრალურ ნაწილში ჩანართების ძირითად ნაწილს შეადგენს სულფიდები, ნიტრიდები, კარბონიტრიდები, რომლებიც ძნელად გამოიყოფა ლითონიდან. ნიტრიდების მცირე ნაწილი მაინც ასწრებს ამოტივტივებას, რაზეც მიგვანიშნებს სხმულის ზედა ნაწილში ნიტრიდების მომატებული რაოდენობა. სოლენოიდის გამოყენებისას ნიტრიდული ჩანართები თავს იყრის ზედაპირულ ფენებში, რადგან აბაზანის ტრიალის დროს ისინი გაიტყორცნება კრისტალიზატორის კედლებისკენ.

ლითონების ელექტრონულ-სხივური დნობა

7.5.1. ვაკუუმური დნობის სხვადასხვა მეთოდის შეფასება

ვაკუუმური დნობის განვითარება გამოწვეულია მეცნიერების ისეთი დარგების განვითარებით, როგორიცაა რადიოელექტრონიკა, ატომური ენერგეტიკა, რაკეტმშენებლობა და სხვ. ამ ამოცანების გადასაწყვეტად საჭირო შეიქნა ისეთი ტექნოლოგიური პროცესების შემუშავება, რომლებიც საშუალებას იძლევა მივიღოთ ძნელდნობადი ლითონების უსუფთავესი სხმულები, აგრეთვე Ti, Zr, Nb და სხვა აქტიური ელემენტების ასევე უსუფთავესი ნამზადები.

გამოკვლევებით დადასტურებულია, რომ ამ ლითონების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები დიდად არის დამოკიდებული მათ სისუფთავეზე. ამიტომაც მათში გახსნილი ზოგიერთი მინარევი (განსაკუთრებით H_2 , N_2 , O_2) მოცილებული უნდა იქნეს. გარდა სისუფთავეისა, ბუნებრივია, საჭიროა დიდი ზომის სხმულების მიღებაც, რომ დამზადდეს მიღები, ფურცლები და სხვ. ყხვნილითა მეტალურგიით და იოდიდური პროცესებით მიიღება მარტო მცირე ზომის და არასასურველი სისუფთავეის დეტალები.

დასახმული ამოცანის ყველაზე უკეთ გადაწყვეტა შესაძლებელია ლითონების მიღებით ვაკუუმურ ან ინერტულ ატმოსფეროში დნობით. პირველი ნაბიჯი Ti, Zr და Mo-ის სხმულების მისაღებად იყო მათი დნობა ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელში კერამიკის ან გრაფიტის ტიგელებში.

თუმცა, როგორც მრავალმა ცდამ დაამტკიცა, დნობის ინდუქციური მეთოდი, მართალია, საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ დიდი სხმულები, მაგრამ ისინი მაინცდამაინც სუფთა ვერ გამოდის, რადგან მაღალი აქტიურობის ლითონების დნობისას ისინი მოქმედებენ ტიგელის მასალაზე და ამ მოქმედების რეაქციის ნარჩენები ლითონში რჩება. ინდუქციური დნობის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ისიც, რომ არის საშიშროება შეიკრას წრედი ინდუქტორის ხეიბს შორის სივრცის იონიზაციის შედეგად.

ამიტომ Ti, Zr, Mo-ის ინდუქციური დნობის მეთოდი ყველგან შეცვლილია დნობის ელექტრორკალური მეთოდით სპილენძის წყლით საცივებელ ტიგელებში (კრისტალიზატორებში). ძნელდნობადი აქტიური ლითონებისა და მათი შენადნობების დნობა

ელექტრორკალური დნობით გამორიცხავს მათ ურთიერთქმედებას ტიგელის მასალასთან.

ელექტრორკალური დნობა ხორციელდება ერთ-ერთი ვარიანტით: 1. ვაკუუმში და ინერტულ ატმოსფეროში დნობა ვოლფრამის ან გრაფიტისაგან დამზადებული არასახარჯი (უდნობი) ელექტროდით, დნობის არეში ჯართის გარედან ჩატვირთვით და 2. ვაკუუმში ან ინერტულ ატმოსფეროში დნობა იმ ლითონისაგან დამზადებული, სახარჯი (გადასადნობი) ელექტროდებით, რომლის მიღებაც არის საჭირო.

როგორც ცდებმა გვიჩვენეს, ელექტრორკალური დნობა არასახარჯი ელექტროდით როგორც ვაკუუმში, ისე ინერტულ ატმოსფეროში არ იძლევა საშუალებას მივიღოთ მაღალი აქტიურობის ძნელდნობადი ლითონების სუფთა სხმულები. მაღალი ტემპერატურა არღვევს ელექტროდებს და ამით სხმულს აჭუჭყიანებს. გარდა ამისა, მოქმედებენ სხვა მიზეზებიც. ამასთან ხდება სხმულების ადგილობრივი (ლოკალური) გაჭუჭყიანება, რაც განსაკუთრებით დაუშვებელია. ამ მოვლენის შესამცირებლად სცადეს უფრო მეტად გაეციეებინათ ელექტროდები, გრაფიტისათვის კი წინასწარ გაეკეთებინათ კარბიდიზაცია და ა.შ. ამ ღონისძიებებმა შეამცირეს, მაგრამ ვერ აღმოფხვრეს ელექტროდის მასალის გადატანა სხმულში.

ამიტომ ამჟამად გამოყენება პოვა ვაკუუმში ან ინერტულ ატმოსფეროში სახარჯი ელექტროდების გადადნობის მაღალი აქტიურობის ძნელდნობადი ლითონების სხმულების მიღების მეთოდმა.

ელექტრორკალური დნობა ინერტულ ატმოსფეროში ვერ უზრუნველყოფს მაღალხარისხოვანი მასალის მიღებას ჯართისგან, რომელიც შეიცავს მინარევებს, რადგან ამ შემთხვევაში არ ხდება ლითონის გასუფთავება. ამიტომ ეს მეთოდი გამოიყენება იმ შენადნობთა სხმულების მისაღებად, რომლებიც შეიცავს ორთქლის მაღალი დრეკადობის მქონე ნივთიერებებს, რაც ამცირებს. აქროლადი კომპონენტების დანაკარგებს.

ამავე დროს, ელექტრორკალური დნობა სახარჯი ელექტროდით დინამიურ ვაკუუმში (გამოყოფილი აირების მუდმივი ამოტუმბვისას) იძლევა ლითონის დეგაზაციისა და ადვილად აორთქლებადი მინარევების მოშორების საშუალებას, რის გამოც ლითონის ხარისხი რამდენადმე უმჯობესდება. ამიტომ ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება წარმოებაში.

მაგრამ როგორც მრავალრიცხოვანმა გამოკვლევებმა დაადასტურა, ელექტრორკალურ დნობას ვაკუუმში სახარჯი ელექტრო-

დების გამოყენებით სპილენძის კრისტალიზატორში დიდი ნაკლოვანებანი აქვს, რომლებიც არ იძლევა საშუალებას დააკმაყოფილოს მასალების ხარისხისადმი წაყენებული მსარდი მოთხოვნები. ეს აიხსნება იმით, რომ ამ მეთოდით დნობისას ლითონი ცოტა ხანს იმყოფება თხევად მდგომარეობაში იმ ტემპერატურებზე, რომლებიც ოდნავ აღემატება დნობის ტემპერატურას, რის შედეგადაც დახალასების რეაქციები ბოლომდე არ მიდის. ზესუფთა ლითონის მისაღებად საჭიროა სხმულების რამდენჯერმე გადადნობა, რაც სამრეწველო თვალსაზრისით არაა მიზანშეწონილი, ხოლო მთელ რიგ შემთხვევებში შეუძლებელიცაა. გარდა ამისა, ხშირად რამდენჯერმე გადადნობაც არ იძლევა ზოგიერთი მინარევის რაოდენობის სასურველ შემცველობამდე შემცირების საშუალებას.

დნობის ამ მეთოდის საკმაოდ დიდ უარყოფით მხარეს წარმოადგენს სახარჯი ელექტროდის დამზადება კაზმიდან, რაც იწვევს საგრძნობ დამატებით ხარჯებს.

ამიტომ ამჟამად მაღალი აქტიურობის ძნელდნობადი ლითონების მიღების არსებული მეთოდების გაუმჯობესების გარდა, მუშავდება სხმულის მიღების ძირეულად განსხვავებული მეთოდები. ერთ-ერთ ასეთ მეთოდს წარმოადგენს ლითონის ინდუქციური დნობა მაგნიტურ ველში შეტივტივებულ მდგომარეობაში. ეს არის დიდი იმედების მომცემი მეთოდი. ის საშუალებას იძლევა თხევადი გადახურებული ლითონი დიდი ხნის განმავლობაში დავაყოფნით მაღალ ვაკუუმში, რაც უზრუნველყოფს მაღალი სისუფთავის ლითონის მიღებას. მაგრამ თუ სხმულს მოვაქციეთ ერთი სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ველში, მის ზედაპირზე გაჩნდება ერთი „ნახერეტი“ მაინც, ანუ ნულოვანი ველის არე, რომელიც მდებარეობს თხევადი ლითონის დონეზე დაბლა, საიდანაც ეს უკანასკნელი შეიძლება გადმოიღვაროს. ამ „ნახერეტების“ „ამოკვება“ მხოლოდ ლითონის ზედაპირული დაჭიმულობითაა შესაძლებელი. ამდენად, შეტივტივებული თხევადი ლითონის რაოდენობა იზღუდება მისი ზედაპირული დაჭიმულობით და სიმკვრივით. როგორც ლიტერატურიდანაა ცნობილი, ასეთ დნობებზე მიღებულია Mo, Ti და სხვა ლითონების რამდენიმე ათეული გრამის წონის სხმულები. კიდევ ერთ უარყოფითი მხარეა ის გარემოება, რომ შეტივტივებული მდგომარეობისას ვაკუუმში ლითონიდან გამოყოფილი აირები ქმნის რეაქტიულ ძალას; ეს კი იწვევს ლითონის მაგნიტურ ველში აქეთ-იქით გაგდებას, რის შედეგადაც იგი შეიძლება შეეხალოს ინდუქტორის ხეივებს. ყველა ამ მიზეზების გამო საეჭვოა, რომ ეს მეთოდი ახლო მომავალში დაინერგოს წარმოებაში.

სხვა მეთოდებიდან აღსანიშნავია ვაკუუმური ინდუქციური დნობა წყლით საცივებელ სპილენძის ტიგელში. ეს მეთოდი გამორიცხავს ვაკუუმურ-ელექტრორკალური ღუმელებისთვის დამახასიათებელ უარყოფით მხარეებს. ამასთან, თბური დანაკარგების თავიდან აცილების მიზნით სპილენძისკედლებიან ტიგელში არსებობს რამდენიმე შესაძლებლობა: გაკეთდეს „ელექტრულად ვიწრო“ კედლები მაგრამ, როგორც გამოთვლები გვიჩვენებენ, ასეთი კედლები მექანიკურად არამდგრადია და ამიტომაც გამოუყენებელი; გაკეთდეს ტიგელი ერთმანეთისგან იზოლირებული სეგმენტებისაგან, რადგან ამ დროს წყდება ინდუცირებული დენის გავლა და ამით მცირდება თბური დანაკარგები კედლებში. ეჭვს იწვევს ის გარემოება, რომ შესაძლებელი იქნება ასეთ ტიგელში მიღებული სხმულის ამოღება, რადგან თხევადი ლითონი სეგმენტებს შორის მანძილებში შევა და იქ გაიყინება.

ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა დნობა ჩავატაროთ ნებისმიერი წნევისას და მივიღოთ ხარისხოვანი სხმული ერთი გადადნობით, თანაც სახარჯი ელექტროდის დამზადების გარეშე. მაგრამ ამ მეთოდის ძალზე დაბალი მ.ქ.კ. არის წარმოებაში მისი დანერგვის ძირითადი შემაფერხებელი მიზეზი.

ლითონის გახურების კიდევ ერთი მეთოდი არის დნობა „ცივი პლაზმის“ გამოყენებით, რომელიც ნაწილობრივ იონიზებულ აირს წარმოადგენს. მაგრამ ამ მეთოდის გამოყენება სუფთა ძნელდნობადი ლითონების სხმულების მისაღებად არა გვეონია გამოდგეს, რადგან აირის გამოყენება აუცილებელია, თუნდაც ინერტულის, რითაც ძნელდება დნობისას გამასუფთაებელი რეაქციების მიმდინარეობა.

ბოლო ხანებში გახურების წყაროდ იყენებენ ლაზერებს. მაგრამ მოწყობილობის სიძვირისა და შედარებით მცირე სიმძლავრეების გამო გახურების ეს წყაროები დნობისათვის, განსაკუთრებით წარმოების მაშსტაბებით, ჯერჯერობით არ არის გამოყენებული.

ზემოაღნიშნულის გარდა, ვაკუუმურ მეტალურგიაში ჩატარებულია გამოკვლევები ლითონების გასადნობად იმ თბური ენერჯის ხარჯზე, რომელიც გამოიყოფა ვაკუუმში ლითონის სწრაფი ელექტრონებით დაბომბვისას. ვაკუუმში ლითონის სადნობად სწრაფი ელექტრონების გამოყენების აზრი ძველია. ეს ჯერ კიდევ ამ საუკუნის დასაწყისში იყო ცნობილი. მაგრამ მაშინ არ იყო განვითარებული ტექნიკა ისე, რომ უზრუნველყო 1,0-4,0 მმ Hg წნევამდე გაიშვიათება, დაბალი ვაკუუმის გარეშე კი ეს მეთოდი

არ გამოდგებოდა. ვაკუუმური ტექნიკის განვითარებამ და სუფთა მასალების მიღების აუცილებლობამ შექმნა საფუძველი გამოყენებული ყოფილიყო ელექტრონული გახურება მრავალი საკითხის გადასატრედად: თხელი ლითონური ფირებისა და დანაყარების მიღება აორთქლებით, ლითონების შედუღება ნახევრადგამტარი მასალების მისაღებად, ლითონებსა და ძვირფას ქვებში უწყვირღესი ნახვრეტების გაკეთება და ა.შ. ელექტრონული დაბომბვის გამოყენებამ ზემოთ მოყვანილ მაგალითებში, ვაკუუმური მეტალურგიის განვითარებამ და მაღალმწარმოებელი დაბალვაკუუმური ტუმბოების შექმნამ საშუალება მისცა მეცნიერებს დაიწყოთ ფიქრი ლითონების დნობის ახალი მეთოდის შექმნას.

ელექტრონებით დაბომბვისას ლითონის გახურების შესწავლის საფუძველზე შეიძლება გვეფიქრა, რომ ამ მეთოდის გამოყენება ლითონების დნობისათვის შესაძლებლობას მოგვცემდა შესამჩნევ ფარგლებში მოგვეშორებინა ის უარყოფითი მოვლენები, რომლებიც ახასიათებს ელექტრულ რკალურ დნობას სახარჯი ელექტროდით.

მაგალითად, ელექტრონებით დაბომბვის მეთოდი საშუალებას იძლევა დავაყოვნოთ ლითონი თხევად მდგომარეობაში მაღალ ვაკუუმში ნებისმიერი დროის განმავლობაში. თხევადი ლითონის ტემპერატურა ამ დროს შეიძლება გაცილებით მეტი იყოს მისი დნობის ტემპერატურაზე. რაც მთავარია, არ არსებობს გამდნარი ლითონის გატუჭყიანების არავეითარი მიზეზი. ამიტომ ლითონის გასუფთავება ელექტრონული დაბომბვის მეთოდით დნობისას წავა უფრო სწრაფად და ბოლომდე, ვიდრე დნობის სხვა მეთოდების გამოყენებისას.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია (და ზოგჯერ გადამწყვეტიც) ელექტრონული დაბომბვით ლითონის დნობის ის უპირატესობა, რომ სხვა ცნობილ მეთოდებთან შედარებით. შესაძლებელია გახურების წყაროს – ელექტრონული სხივის სიმძლავრის, ფორმის და მიმართულების მოქნილი მართვა. ეს კი საშუალებას იძლევა გადაწყდეს მრავალი ტექნოლოგიური ამოცანა: გამოდნეს რთული სახის სხმული; გადადნეს ჯართი; სრულიად გამოირიცხოს დანადგარის აფეთქების საშიშროება შესაბამისი საკონტროლო საშუალებების გამოყენებით.

7.5.2. ელექტრონებით გახურების პრინციპი

ამაჩქარებელ ელექტროსტატიკურ ველში თავისუფალი ელექტრონები აჩქარდებიან დიდ სიჩქარეებამდე; ელექტრონების

კონას მიმართავენ გასახურებელ საგანზე. საგანთან დაჯახების შედეგად ელექტრონები მკვეთრად მუხრუჭდება, გამოიყოფა დიდი რაოდენობის თბური ენერგია. ამ ენერგიით ხურდება საგანი, რომელსაც სამიზნეს უწოდებენ.

თავისუფალი ელექტრონების წყაროს წარმოადგენს გაიარვარებული ფირფიტ. ს ან სპირალის კათოდი. ელექტრონები კათოდიდან ამოიტყორცნებიან თერმოელექტრონული ემისიის გამო. ემისირებულ ელექტრონებს თავდაპირველად დიდი სიჩქარე არ გააჩნია, მაგრამ, თუ სისტემაში მოვათავსებთ ანოდს კათოდთან შედარებით დიდად განსხვავებული პოტენციალით (პოტენციალთა დიდი სხვაობა), მაშინ კათოდიდან ანოდამდე გ³აში ელექტრონები აჩქარდება. ბუნებრივია, რომ რაც უფრო დიდია პოტენციალთა სხვაობა, მით მეტ აჩქარებას იღებენ ელექტრონები. თუ ანოდის შემდეგ მოვათავსებთ ელექტრომაგნიტურ ველს, მაშინ შეიძლება მოძრავი ელექტრონები ისე შევაჯგუფოთ, რომ მივიღოთ გასახურებელ ობიექტზე მიმართული საკმაოდ ხისტი კონა.

მაღალი ვაკუუმში თითქმის არ ხდება ელექტრონების შეჯახება ერთმანეთთან ან აირის მოლეკულებთან. ამიტომ მთელ ენერგიას, რომელსაც შეიძენს ამაჩქარებელი ველი გავლისას, ელექტრონები გადასცემს გასახურებელ საგანს – სამიზნეს. ენერგიის მხოლოდ ძალიან მცირე ნაწილი (რამდენიმე პროცენტი) იხარჯება რენტგენის გამოსხივებასა და ელექტრონების მეორად ემისიაზე.

ელექტრულ ველში ელექტრონების სიჩქარე შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით:

$$v = 593\sqrt{U} \text{ კმ/წმ.}$$

სადაც U არის პოტენციალთა სხვაობა ამაჩქარებელ ველში. როცა $U=30$ კვ, მაშინ $v=105$ კმ/წმ.

საჭიროა გავითვალისწინოთ კათოდის ტემპერატურისა და კათოდის ზედაპირიდან ელექტრონების ამოგლეჯის მუშაობის გავლენა ელექტრონების თერმოელექტრულ ემისიაზე. ელექტრონების ამოგლეჯის მუშაობა იანგარიშება კრისტალის მესერში ატომებს შორის მანძილით, ვალენტობით და ა.შ. თუ არ გავითვალისწინებთ ამაჩქარებელი ველის გავლენას, რომელიც ხელს უწყობს კათოდის ზედაპირიდან ელექტრონების ამოგლეჯას, მაშინ კათოდიდან ელექტრონების ემისია შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით:

$$I_{\text{გ}} = AT^2 e^{\frac{1}{k}}$$

სადაც $I_{\text{კ}}$ – კათოდის ზედაპირის ერთეულიდან ემისიის დენია, კ/სმ².

A – ლითონის ბუნებასა და სისუფთავეზე დამოკიდებული მუდმივა, $\nu/(\text{სმ}^2 \cdot \text{K}^2)$;

T – კათოდის აბსოლუტური ტემპერატურა, K (კელვინი);

b – მუდმივა, რომელიც უდრის $\frac{G_0 I_0}{K}$, ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა, ევ*;

K – ბოლცმანის მუდმივა, $1,38 \cdot 10^{-16}$ ერგ/K.

ეს ფორმულა გვჩვენებს, რომ კათოდისათვის უფრო უკეთესია ის ლითონი, რომლიდანაც ელექტრონის ამოსაგლეჯად მცირე მუშაობაა საჭირო და აქვს დნობის მაღალი ტემპერატურა. ასეთი მასალებია W, Ta, Mo. ეოლფრამისათვის ელექტრონის ამოგლეჯის მუშაობა 4,522 ევ-ია, ხოლო დნობის ტემპერატურაა 3410 °C. ტანტალისა და მოლიბდენისათვის 4,1 და 4,3 ევ და 3000 °C და 2630 °C შესაბამისად Ta და Mo-საგან შეიძლება მივიღოთ ფურცელი და ლენტი კათოდის ნებისმიერი ფორმის დასამზადებლად. მაგრამ Ta-ის კათოდები „იწამლება“ ლითონის გახურების შედეგად გამოყოფილი აირებით და ჩქარა გამოდის მწყობრიდან.

ელექტრულ ველში აჩქარებული ელექტრონი ურთიერთქმედებს მაგნიტურ ველთან, რომელიც ცილის მისი მოძრაობის ტრაექტორიას.

განვიხილოთ ელექტრონის მაგნიტურ ველში მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევები:

1. სიჩქარე – ელექტრონის მოძრაობის ვექტორი – პარალელურია მაგნიტური ველის; მაგნიტური ველის მოქმედება ელექტრონზე ნულის ტოლია.

2. ელექტრონის მოძრაობის მიმართულება მაგნიტური ველის პერპენდიკულარულია. ელექტრონის მოძრაობის ტრაექტორია მაგნიტური ველის მოქმედებით მრუდდება და შემოწერს შეკრულ წრეწირს. მაგნიტური ველის დაძაბულობის მიმართულების პერპენდიკულარულ სიბრტყეზე. ამ წრეწირის რადიუსია

$$r = mV/eH$$

სადაც V ელექტრონის სიჩქარეა;

m – ელექტრონის მასა;

e – ელექტრონის მუხტი;

H – მაგნიტური ველის დაძაბულობა.

* „ევ“ აღნიშნავს სიტყვას 'ელექტრონვოლტი'. 1 ელექტრონვოლტი ის ენერჯიაა (მუშაობა), რომელსაც შეიძენს 1 ელექტრონი 1 ვოლტი პოტენციალთა სხვაობის მქონე ელექტრულ ველში აჩქარებისას.

3. ელექტრონის მოძრაობის სინქარე ადგენს კუთხეს მაგნიტური ველის მიმართულებასთან. ამ შემთხვევაში ელექტრონი აღწერს მაგნიტური ველის მიმართულების ირგვლივ ხრახნისებურ სპეციალურ ხაზს.

მოძრაე ელექტრონზე მაგნიტური და ელექტროსტატიკური ველის ერთდროული მოქმედებით მისი ტრაექტორია ხდება უფრო რთული და უახლოვდება ციკლოიდას.

7.5.3. ელექტრონულ-სხივური სადნობი ღუმელის ძირითადი ელემენტები

ელექტრონულ-სხივური სადნობი ღუმელი შედგება ორი ძირითადი ნაწილისაგან: ვაკუუმური კამერა და ელექტრონების სატყორცნი (ზარბაზანი, ანუ ქვემეხი). 7.6 ა და ბ სურათებზე სქემატურად ნაჩვენებია ელექტრონულ-სხივურ ღუმელთა ორი ძირითადი ტიპი.

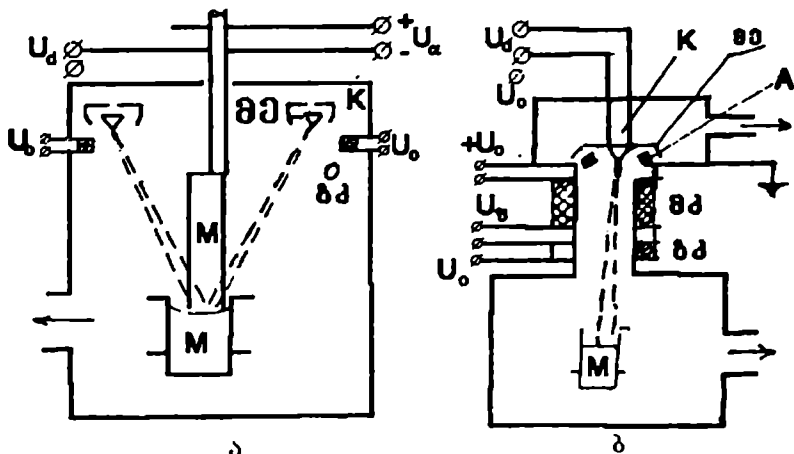
ელექტრონულ-სხივურ ღუმელში ვაკუუმური კამერა საჭიროა დაბალი ნარჩენი წნევის უზრუნველყოფისთვის. კამერაში შესაძლებელია ელექტრონული კონის შექმნა და ლითონის ვაკუუმური დნობის განხორციელება.

ელექტრონების სატყორცნი ეწოდება იმ მოწყობილობას, რომელიც საშუალებას იძლევა შეიქმნას თავისუფალი ელექტრონების მძლავრი ნაკადი, მისცეს მათ დიდი სინქარე და მიმართოს ეს ელექტრონული კონა გასადნობ ლითონზე. თავის მხრივ სატყორცნი შედგება უფრო მარტივი ელემენტებისაგან.

სურათზე 7.6 - ა მოცემულია პირველი ტიპის ელექტრონულ-სხივური სადნობი ღუმელის სქემა გასადნობანოდინი სატყორცნით. თავისუფალი ელექტრონების წყაროდ წარმოსდგება რკალური კათოდი K, რომელიც ან ერთიანი მრგვალი, ან მრავალკუთხედის სახით კეთდება. კათოდის კეება ხორციელდება წყაროს P, ძაბვით.

ანოდური ამაჩქარებელი ძაბვა მიიყვანება კათოდთან და გასადნობ ლითონთან M, რომელიც ამ შემთხვევაში ანოდს წარმოადგენს. ამრიგად, ელექტროდებს (კათოდსა და ანოდს) შორის სივრცეში იქმნება ამაჩქარებელი ელექტრული ველი.

ელექტრული ნაკადის ვიწრო კონის შესაქმნელად იხმარება მაფოკუსირებელი ელექტროდი (მე), რომელიც ელექტროსტატიკურ ლინზას წარმოადგენს. მაფოკუსირებელი ელექტროდი ჩვეულებრივ იმყოფება კათოდის პოტენციალის ქვეშ და ელექტროდებშუა სივრცეში ელექტრონების გამოყვანას უშეუბნებს მხოლოდ საჭირო მიმართულებით. კონის შემდგომი გადახრა წარმოებს მაგნიტური ველის



სურ. 7.6 ელექტრონულ-სხივურ ღუმელთა ძირითადი ტიპები

გავლენით, რომელსაც წარმოქმნის გადამხრელი კოჭები გკ U_0 ძაბვით.

წარმოებასა და საკვლეე დაწესებულებებში გაცილებით უფრო ფართო გამოყენება პოვა ელექტრონულ-სხივურმა ღუმელებმა, რომლებიც აღჭურვილია არაგასადნობი ანოდით. ესენი წარმოადგენენ მეორე ტიპის ღუმელებს და მათი სქემა ნაჩვენებია 7.6 ბ სურათზე.

როგორც სქემიდან ჩანს, ამ ღუმელის ძირითად თავისებურებას წარმოადგენს სპეციალური ელექტროდის - A ანოდის არსებობა, რომელიც შესრულებულია ნახერეტიანი დიაფრაგმის სახით. ანოდი ელექტრულად დაკავშირებულია ღუმელის კორპუსის დამიწებასთან, ხოლო კათოდი იზოლირებულია მიწისაგან. K კათოდი მზადდება ძნელდნობადი ლითონისაგან (ვილინდრული, ბრტყელი ან რომელიმე სხვა გეომეტრიული სხეულის ფორმით).

გახურების ხერხის მიხედვით ელექტრონულ-სხივური სადნობი ღუმელების კათოდები შეიძლება ორი ძირითადი სახისაა: პირდაპირი და არაპირდაპირი გახურების კათოდები. მავთულისებრი კათოდის პირდაპირი გახურება ხორციელდება მასში მუდმივი ან ცვლადი დენის გატარებით. არაპირდაპირი გახურების სისტემებში განასხვავებენ ძირითად და დამხმარე კათოდებს. დამხმარე კათოდებს, სვეულებრივ, ამზადებენ ვოლფრამისგან და ახურებენ მასში ცვლადი დენის გატარებით. ძირითადი კათოდი ხურდება ან დამხმარე კათოდისგან გამოყოფილი სითბოთი, ან დამხმარე კათოდიდან ემისირებული ელექტრონების ხარჯზე. ამ შემთხვევაში სქემის

ამ ნაწილის კათოლიკე წარმოდგენს ანოდს. ამ ორ კათოდს შორის მოდებულია მუდმივი დენის მცირე ამაჩქარებელი ძაბვა. ძირითადი კათოდის ტემპერატურას აწესრიგებენ ან მუდმივი დენის დამხმარე ამაჩქარებელი ძაბვის ან დამხმარე კათოდის გამაგარვარებელი დენის ძალის ცვლილებით.

არაპირდაპირი გახურების კათოდებს საგრძნობი უპირატესობები აქვთ პირდაპირი გახურების კათოდებთან შედარებით. ეს გამოიხატება დეტალების მექანიკური დამუშავების უფრო მაღალ სიზუსტეში, სფერული ან ელიფსური ზედაპირის კათოდების დამზადების შესაძლებლობაში, რაც უზრუნველყოფს ელექტრონული კონის კარგ ფოკუსირებას და ჩამოყალიბებას. გარდა ამისა, არაპირდაპირი გახურების კათოდები შეიძლება დამზადდეს დიდი ზომის აქტიური ზედაპირით.

ძირითად კათოდსა და ანოდს შორის მიიყვანება მაღალი ამაჩქარებელი ძაბვა. მაფოკუსირებელი ელექტროდის – (მე) დანიშნულებაა კათოდის ზედაპირიდან ამოსროლილი ელექტრონების წერილ კონად ჩამოყალიბება, რომელიც უნდა გავიდეს დიაფრაგმა-ანოდის მცირე დიამეტრის ხვრელში. მაფოკუსირებელ ელექტროდზე შეიძლება მივაწოდოთ სხვადასხვა პოტენციალი U კათოდის მიმართ – ნულიდან დაწყებული რამდენიმე უარყოფითი მნიშვნელობით დამთავრებული. მაგრამ ხშირად მაფოკუსირებელ ელექტროდს აწოდებენ კათოდის პოტენციალს. კათოდის ზედაპირიდან ამოსროლილი ელექტრონების ურთიერთქმედება ამავ ელექტროდის ელექტრულ ველთან ქმნიან ძალას, რომელიც ელექტრონებს სატყორცნის ღერძისკენ მიმართავს.

მაფოკუსირებელი სისტემა, შემდგარი ერთი ან რამდენიმე მაფოკუსირებელი კოჭასგან (მკ), რომელიც იკვებება U ძაბვის წყაროდან და ქმნის მაგნიტურ ველს, მოთავსებულია ანოდის ქვევით ვაკუუმ-კამერაში ან მის საზღვრებს გარეთ და საჭიროა ანოდში გასული ელექტრონების ვიწრო კონად შეკრებისათვის. მაფოკუსირებელი სისტემის შემდეგ, ჩვეულებრივ, მოთავსებულია გადამხრელი სისტემა (გკ), რომლის დანიშნულებაა მიმართოს ელექტრონული კონა გასადნობ ლითონზე და გადაადგილოს ის სხმულის ზედაპირზე მისი თანაბარი გადნობისათვის.

არაგასადნობანოდისანი ღუმელების ერთ-ერთი დამახასიათებელი თავისებურება სადნობ სიერცეში ამაჩქარებელი ველის უქონლობა; გარდა ამისა, ვაკუუმის მიხედვით, ელექტროდის ქვეშა და სადნობ სიერცეებად დაყოფის შესაძლებლობა. ამგვარი გაყოფის მიზანია იმ საშიშროების თავიდან მოშორება, რომელიც შეიძლება წარმოიშვას მაღალი ძაბვის ელექტრული განმუხტვით კათოდსა

და ანოდს შორის, აირების დიდი რაოდენობის გამოყოფის გამო. ვაკუუმის მიხედვით გაყოფა საშუალებას იძლევა ვიქონიოთ უფრო მაღალი ვაკუუმში ელექტროდებს შორის სივრცეში. ამისათვის სადნობ ღუმელს ხშირად აქვს ორი კამერა: სატყორცნისა და სადნობი; ისინი ერთმანეთისგან გაყოფილია დიაფრაგმა- ანოდით, რომელსაც აქვს ხერხელი ელექტრონული კონის გასატარებლად.

7.5.4. ელექტრონულ-სხივური სადნობი დანადგარების კონსტრუქციები

ელექტრონული გახურების შესაძლებლობამ ფართო გამოყენება პოვა სადნობ დანადგარებში. ამ დანადგარების განვითარება გაცილებით უფრო სწრაფად მიმდინარეობდა, ვიდრე ნებისმიერი სხვა სადნობი აგრეგატებისა. სულ მოკლე ხანში შეიქმნა ათობით სხვადასხვა მეტალურგიული დანადგარი. ასეთი დიდი რაოდენობის კონსტრუქციების არსებობა იმით არის გამოწვეული, რომ კონსტრუქტორები ცდილობენ ჯერ შექმნან როგორც უნივერსალური, ისე ვიწროსპეციალიზებული დანადგარები, უმეტესად ეკონომიური კერძო შემთხვევებისთვის. ახლა უკვე იმდენი გამოცდილებაა შეძენილი, რომ უფრო ადვილია არსებულ კონსტრუქციებში გარკვევა და ამორჩევა.

ყველა არსებული კონსტრუქციული სქემა შეიძლება დაიყოს ორ დიდ ჯგუფად. პირველ ჯგუფში შედის დანადგარები სადნობი ანოდით ანუ ის დანადგარები, რომლებშიც ამანქარებელი ეკლი მოდებულია კათოდსა და გასახურებელ ლითონს – ანოდს შორის. მეორე ჯგუფს განეკუთვნებიან დანადგარები არაგასადნობი ანოდით, რომლებშიც ძაბვა მოდებულია კათოდსა და ამანქარებელ ელექტროდს – ანოდს შორის. ამანქარებელ ელექტროდს ანუ, როგორც მას ეძახიან, ანოდს აქვს ზედმეტი ნახვრეტი ელექტრონული კონის გასატარებლად. ეს ორი ჯგუფი ერთმანეთისაგან განსხვავდება უპირველეს ყოვლისა ამანქარებელი ელექტროული ეკლის მოდებით. ეს მანევენებელი არის ძირითადი განმსაზღვრელი როგორც დანადგარის ტექნოლოგიის, ისე მისი კონსტრუქციული მონაცემებისა.

7.5.5. გასადნობელექტროდიანი დანადგარები

თავისი შედარებით მარტივი აგებულებით ამ ჯგუფებში თავდაპირველად დიდი გავრცელება პოვა და წარმოადგინდა

წარმოების ძირითად დანადგარს. მასში აღნობენ ძნელდნობად ლითონებსა და შენადნობებს და იმ შენადნობებს, რომლებიც ბევრ აქროლადებს არ შეიცავს. ასეთი დანადგარი შეიძლება აიგოს დიდი სიმძლავრისა და ხელსაყრელია მსხვილი სხმულების საწარმოებლად.

პირველი საწარმოო ღუმელები გამოჩნდა 1958 წ. მათში აღნობდნენ რამდენიმე ათეული და ასეული კგ მასის სხმულებს. შემდეგში კი, მათი სიმძლავრის მომატების ხარჯზე (500-1500 კვტ), გაიზარდა სხმულების ზომაც და ღუმელების რაოდენობაც.

ელექტრონების გაფანტვის თავიდან აცილებისა და მათი გასახურებელი ლითონისკენ მიმართვისათვის ვოლფრამის კათოდს გარს არტყამენ მაფოკუსირებელ ეკრანს. პატარა სიმძლავრის დანადგარებში მაფოკუსირებელ ეკრანს ამზადებენ W, Ta, Mo-ს ფურცლებისაგან. დიდი სიმძლავრის ღუმელებში საჭირო ხდება წყლით საცივებელი ეკრანის შექმნა. კაზმი დნობისათვის მიეწოდება ამწონი ბაქნიდან. სხმულის დნობასთან ერთად ხდება მისი გამოწევა ისეთი სისწრაფით, რომ კრისტალიზატორში მუდმივად იყოს თხევადი ლითონი.

აღნიშნული დანადგარის ძირითადი უარყოფითი მხარე ის არის, რომ ამაჩქარებელი ელექტრული ველი სადნობ სივრცეშია. სანამ ელექტრულ ველში შესაძლებელია მაღალი ვაკუუმის შენარჩუნება, ვინაიდან არ არის ლითონის ორთქლი და გამოყოფილი აირები, ვაკუუმი კათოდსა და ანოდს - გასახურებელ ლითონს შორის მტკიცე და ელექტრულად მდგრადია. დნობის პროცესს არ უშლის ხელს ელექტრული განმუხტვა. რეგორც კი ვაკუუმი 10^{-4} მმ Hg-ის ქვევით ვარდება, იქმნება განმუხტვის წარმოქმნის საშიშროება. შეიძლებოდა, რასაკვირველია, წინასწარ გაგვედნო ვაკუუმში ლითონი და მოგვეშორებინა მისგან აირები და აქროლადები, მაგრამ ეს ძალიან აძვირებს ლითონს და ზოგჯერ ძლიერ მოუხერხებელია.

დანადგარის უარყოფით მხარეს ეკუთვნის ის გარემოებაც, რომ კათოდი ძალიან ახლოსაა გასადნობ ლითონთან. ამის გამო მას ეშხეფება გამდნარი ლითონი, ან მასზე კონდენსირდება ლითონის ორთქლი. ამიტომ კათოდი ან ამოიზრდება, ან პირიქით, იხსნება შეშხეფებულ ლითონში.

7.5.6. ელექტრონულ-სხივური დანადგარები არაგასადნობი ანოდით

ამჟამად ასეთი სახის დანადგარები, რომელთაც პირობითად II ტიპის დანადგარებს უწოდებენ, ძირითადად წარმოებაში გამოიყენება. ამაჩქარებელი ელექტრონული ველის გამოტანამ სადნობი არიდან ხელი შეუწყო დანადგარის მუშაობის საიმედოობას, კათოდისა და მაღალი ძაბვის ქვეშ მყოფი სხვა ნაწილების მუშაობის პირობების გაუმჯობესებას. დანადგარის ტექნოლოგიური შესაძლებლობის გაფართოებას.

დენის მიმყვანი დეტალების სიშორე კრისტალიზატორიდან აადვილებს კაზმის შეტანას სადნობ არეში. ამასთან, შეიძლება ვიხმაროთ ნებისმიერი სახის ჯართი: ნაჭრები, ფხენილი, წნელები და სხვ.

კრისტალიზატორის თავზე არსებული თავისუფალი არის გაზრდა აუმჯობესებს ლითონიდან გამოყოფილი აირების ამოტუმბვის პირობებს.

საერთოდ, ელექტრონულ-სხივური დანადგარების ერთ-ერთ ძირითად კვანძს წარმოადგენს ელექტრონების სატყორცნი. მისი კონსტრუქციის დამუშავებისას ძირითადად უნდა ვიხელმძღვანელოთ იმ მოსაზრებით, რომ ლითონთა გახურებისთვის ვაკუუმის პირობებში საჭიროა მივიღოთ ელექტრონების უმცირესი დამეტრის კონა დიდი სიმძლავრითა და სიმკვრივით. ელექტრონების მკვრივი კონის მიღების სირთულე გამოიხატება, ჯერ ერთი, იმაში, რომ კათოდის მახლობლად სივრცობრივი განმუხტვის ღრუბლის გაჩენა ხელს უშლის ელექტრონების ამოსროლას კათოდიდან, ამასთან ყველა ელექტრონი ვერ ასწრებს ანოდისკენ გადასვლას; და მეორეც იმაში, რომ ელექტრონულ კონაში მოცულობითი მუხტის არსებობის გამო ხდება ელექტრონების განზნევა. მაფოკუსირებელი ელექტროდის შესაბამისი სახის ან ელექტროსტატიკური ლინზების შერჩევით კათოდსა და ანოდს შორის სივრცეში შეიძლება შევქმნათ ისეთი ელექტროსტატიკური ველი, რომელიც დააფოკუსებს ელექტრონების კონას ანოდის სიბრტყეზე ანოდის ნახვრეტში. საერთოდ, ანოდებს ამზადებენ პატარა ნახვრეტებით, სატყორცნის კამერასა და კათოდის ახლო სივრცეში წნევის დიაფრაგმირებისათვის.

ანოდიდან გამოსვლის შემდეგ ელექტრონული კონა ფართოვდება. მის შესაყურსად იყენებენ მაგნიტურ ლინზებს. მაგნიტური ლინზები წარმოადგენს კოჭებს, რომლებშიაც გადის დენი. კოჭები ქმნის არათანაბარ მაგნიტურ ველს, რომელშიაც

იკვრება სხვადასხვა მიმართულებით მოძრავი ელექტრონები. სხივი გადის გრძელ მიმართულ მილში – სხივგამტარში, რომლის მეშვეობით ელექტრონული კონის წარმოქმნელი სივრცე გამოიყოფა სადნობი კამერისაგან.

იმისათვის, რომ ღუმელში მოხდეს მთელი კაზმის თანაბარი გახურება და გადნობა, აუცილებელია ელექტრონული კონის ენერჯის თანაბარი განაწილება გასახურებელ სხმულზე ან კაზმზე. ელექტრონული კონით გახურების პროცესი გამოირჩევა იმით, რომ ელექტრონები ძალიან მცირე სიღრმეზე შეაღწევენ ლითონში და ხდება მისი ზედაპირული გახურება.

მიუხედავად დიაფრაგმებისა, ლითონის ორთქლი მაინც ხვდება კათოდის სივრცეში, კონდენსირდება მასზე და შეუძლია დააზიანოს იგი. ასე რომ არ მოხდეს, მიზანშეწონილია ელექტრონების სატყორცნი რაიმე კუთხით დაიდგას გამდნარი ლითონის მიმართ ისე, რომ აორთქლების მიმართულება არ დაემოხვეს სატყორცნის ღერძს. ელექტრონული კონის მიმართულება შეიძლება შეიცვალოს ნებისმიერი კუთხით გადამხრელი სისტემის მეშვეობით. ეს განსაკუთრებით მოსახერხებელია ერთ სადნობ დანადგარში რამდენიმე ელექტრონული ღუმელის დაყენების შემთხვევაში. რამდენიმე სატყორცნის გამოყენება შესაძლებელს ხდის გაეზარდოს ღუმელის სიმძლავრე, უზრუნველყოთ კაზმისა და თხევადი ლითონის აბაზანის თანაბარი გახურება. განსაკუთრებით კარგია რამდენიმე ქვემეხის გამოყენება რთული სახის სხმულების წარმოებისას, როცა ეს სხმულები ძნელდნობადი ლითონისგან მიიღება.

7.5.7. ელექტრონულ-სხივური სადნობი საწარმოო ღუმელები

ელექტრონების სატყორცნის მქონე სადნობი დანადგარები შედგება კამერისაგან. კამერაში მოთავსებულია ან სხმულის გამოსაწევით აღჭურვილი სპილენძის წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი, ან სპილენძის წყლით საცივებელი ჯამი-ტიგელი გარნისაჟში დნობისათვის. კამერას აქვს მძლავრი ვაკუუმური სისტემა, რომელიც შედგება ტუმბოების სამი ჯგუფისაგან: მაღალ-ვაკუუმური დიფუზიური, ბუსტერული ორთქლზეთიანი ან ოროტორიანი და მექანიკური ფორვაკუუმური ტუმბოები. ჩვეულებრივ, დნობა მიდის 10^4 – 10^5 მმ Hg წნევისას, მაგრამ იმ შემთხვევაში, თუ ელექტრონების სატყორცნს აქვს თავისი საკუთარი ამოსატუმბი მოწყობილობა, სადნობ კამერაში წნევა შეიძლება იყოს 10^2 მმ Hg.

ამას დიდი მნიშვნელობა აქვს იმ შემთხვევაში, როცა აღნიშნულ შენადნობებს, რომლებშიც არის კომპონენტები ორთქლის მაღალი დრეკადობით, ან როცა კაზმი ძლიერ დატუტყუიანებულია და შესაძლებელია აირების დიდი რაოდენობის მოულოდნელი გამოყოფა, ხოლო ტუმბოები ვერ აუეღენ აირების ამ რაოდენობის გამოყოფას. თუ მაღალი წნევა ავიდა ანოდსა და კათოდს შორის სხივის წარმოშობის არეში, მაშინ შესაძლებელია განმუხტვის წარმოქმნა და ავტომატური სისტემა გამორთავს დანადგარს.

გადასადნობი ლითონის მრგვალი ან ოთხკუთხა განივიკვეთის ძელი მიეწოდება კამერაში, კრისტალიზაციის ღერძის მიმართულებით ზევიდან ან გვერდიდან. გვერდიდან მიწოდებისას გადასადნობი ძელი ფარავს აბაზანას სხივებისაგან და ამიტომ, გამდნარი ლითონი ხურდება არათანაბრად, რაც არასასურველია.

დიდ ღუმელებში გადასადნობი ძელები მიეწოდება რაბული მოწყობილობიდან, რაც დნობას ხდის უწყვეტს და არ არის საჭირო ღუმელის გახსნა.

დიდ ღუმელებში აყენებენ რამდენიმე ელექტრონულ სატყორცნს, რომელთაგან ზოგი ახურებს ლითონის ძელებს, ზოგი კი - გამდნარ ლითონს.

თავი VI

კლავშურ-რკალური დნობა

7.6.1. დაბალტემპერატურული კლავშის ფიზიკური ბუნება

როგორც უკვე იყო ნათქვამი, ბოლო ხანებში სულ უფრო დიდი ყურადღება ექცევა გამოდნობილი ლითონების და შენადნობების ხარისხს. ეს იმიტომ ხდება, რომ ჩვეულებრივ, ფოლადსადნობ აგრეგატებში გამოდნობილი ფოლადების თვისებები ვერ აკმაყოფილებს წამყვანი დარგების მოთხოვნილებებს. ლითონის თვისებების გაუმჯობესების ერთ-ერთი ხერხი კი მისი ხარისხის გაუმჯობესებაა. ეს, უპირველეს ყოვლისა, ეხება ძნელდნობად ლითონებსა და მათ შენადნობებს, მაღალლევირებულ ფოლადებს და სხვ. ამიტომ მაღალხარისხოვანი ლითონების გამოდნობის პროგრესული მეთოდების დამუშავება და მათი წარმოებაში დანერგვა

თანამედროვე მეტალურგიის ერთ-ერთი ძირითადი საკითხია. თუ ამ მეთოდებიდან ყველაზე მეტად ლითონების ხარისხის გაუმჯობესების ელექტროწიფური გადადნობის მეთოდი განვითარდა ყოფილ საბჭოთა კავშირში და მის ფარგლებს გარეთ უპირატესობით სარგებლობს უმთავრესად ვაკუუმურ-რკალური და ნაკლებად – ელექტრონულ-სხივური გადადნობით ლითონთა ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდი. მაგრამ სპეციალური ლითონებისა და მათი შენადნობების ქიმიური შედგენილობა იმდენად მრავალნაირია, რომ ამ მეთოდების გამოყენება მათი მიღების საშუალებას არ გვაძლევს. მაგალითად, ვაკუუმურ-რკალურ და ელექტრონულ-სხივური გადადნობის ღუმელებში ვერ ხერხდება ასოტისა და მანგანუმის შემცველ შენადნობთა მიღება, ელექტროწიფური გადადნობისას – ტიტანისა და ალუმინიანი შენადნობების. ამიტომ საჭიროებამ მოითხოვა შექმნილიყო დნობის ახალი მეთოდი ლითონებისა და მათი შენადნობების ხარისხის გასაუმჯობესებლად. ასეთი მეთოდია პლაზმურ-რკალური მეთოდი.

ხარისხოვანი ფოლადებისა და სპეციალური შენადნობების გამოდნობის სხვა მეთოდებთან შედარებით პლაზმურ-რკალურ გადადნობას შემდეგი განმასხვავებელი თავისებურებანი აქვს:

1. პლაზმური დნობა, ღია რკალური და ვაკუუმურ-რკალური დნობისგან განსხვავებით, ხასიათდება ელექტრული პარამეტრების გაცილებით უფრო მაღალი მდგრადობით, რაც ახასიათებს შეკუმშულ რკალს. კერძოდ, ეს საშუალებას იძლევა მივიღოთ სხმული უფრო უკეთესი ზედაპირით, რაც გამორიცხავს ჭედვის ან გლინვის წინ მის მიქანიკურ დამუშავებას.

2. პლაზმურ-რკალური დნობისას სადნობ კამერაში შეიძლება გამოვიყენოთ აირების სხვადასხვა ნარევეები (ნეიტრალური, ადმდგენელი, დამუხანგველი) და სხვადასხვა წნეეები (დაბალი, მაღალი).

3. პლაზმურ-რკალური დნობისას ღუმელის კამერაში ნეიტრალური აირის ატმოსფერული ან მომატებული წნევისას შენადნობის მალეგირებელი ელემენტების დანაკარგი (აქროლადებისა ცი) უმცირესამდე ეცემა, ეს კი ერთ-ერთი ძირითადი უპირატესობაა ვაკუუმურ დნობებთან შედარებით. ამავე დროს შესაძლებელია ლითონის გამოხდითი (სადისტილაციო) დახალასება, თუ დნობა მიდის ღუმელის კამერაში 10^{-3} – 10^{-1} მმ Hg წნევისას. ეს პროცესი მავნე აქროლადი მინარევეების მოცილებისა და შენადნობთა ძირითადი კომპონენტების აორთქლებით გამოწვეული დანაკარგების მიხედვით იკაავებს საშუალო ადგილს არგონის I ატმ წნევისას პლაზმურ დნობასა და ღრმა ვაკუუმის პირობებში

დნობას შორის, თუმცა, განსხვავდება რეჟიმის დიდი მდგრადობით და განხორციელების სიმარტივით.

4. აღმდგენელი ან ნეიტრალური ატმოსფერო გამოიყენება დამახალსებელ წიდასთან ერთობლიობაში, რაც აღრმავებს დახალასებას (რაფინირებას). გარდა ამისა, ელექტროწიდური დნობისაგან განსხვავებით, წიდას არ წაეყენება მაღალი ელექტროგაიტარებლობის მოთხოვნა.

5. პლასმური დნობისას ელექტროდების დნობის სინქარე არ არის დამოკიდებული პლასმური რკალის სიმძლავრეზე. ეს კი საშუალებას იძლევა, როცა ამას მოითხოვს მეტალურგიული მოსაზრებები, შეიცვალოს სხმულის მიღების სისწრაფე. ამასთან, არ იცვლება აბაზანაზე რკალის თბური ნაკადის სიდიდე და შეიძლება კიდევ აბაზანის ოხვევად მდგომარეობაში გაჩერება მასში ელექტროდული ლითონის დაუმატებლად. ყველაფერი ეს აფართოებს ლითონის კრისტალიზაციის პროცესების მართვის საშუალებებს და შესაძლებელია სხმულის საჭირო სტრუქტურის მიღება.

6. ვაკუუმურ-რკალური და ელექტროწიდური პროცესებისაგან განსხვავებით, შესაძლებელია ნატროვანი მასალის გადადნობა.

7. ჩვეულებრივ, მეტალურგიულ პროცესებთან და აგრეგატებთან ერთობლიობაში, პლასმური რკალის ენერჯის წყაროებს შეუძლია საგრძნობლად გაზარდოს მათი ეფექტურობა. მაგალითად, პლასმურ-ინდუქციური დნობა.

პლასმური დნობის ძირითადი განმასხვავებელი ნიშანი სხვა დნობებისაგან არის მისი თბური ენერჯის წყარო — პლასმა. განვიხილოთ ჯერ პლასმის ფიზიკური ბუნება და შემდეგ მისი ელექტრული პარამეტრები.

როგორც ცნობილია, დედამიწის უდიდესი ნაწილი იმყოფება სამი აგრეგატული მდგომარეობიდან (მყარი, თხევადი, აირადი) ერთ-ერთში.

პლასმას ხშირად უწოდებენ ნივთიერების მეოთხე მდგომარეობას, რომელიც ხასიათდება შემდეგი თვისებებით: გაატაროს ასობით და ათასობით ამპერის ელექტროდენი; ააჩქაროს ან შეანელოს თავისი მოძრაობა; შეიცვალოს მოყვანილობა მაგნიტური ველის ზემოქმედებით; თავისებურად გაატაროს ელექტრომაგნიტური და სხვა ტალღები.

პლასმას ხშირად ეძახიან აგრეთვე იონიზებულ აირს, ე.ი. აირს, რომელშიც არის თავისუფალი მუხტები იონების, ელექტრონების ან სხვა დამუხტული ნაწილაკების სახით, რომელთაც შეუძლიათ გადაადგილება ელექტრული ველის ზეგავლენით.

იმის გასარკვევად, თუ რომელი დასახელებაა უფრო შესატყვისი, დაწვრილებით განვიხილოთ ნიუთიერების იონიზაციის მოვლენა. იონიზაცია – ესაა ნეიტრალური ნაწილაკების (მოლეკულა, ატომი) გადაქცევა დადებითი ან უარყოფითი ელექტრული მუხტის მატარებელ ნაწილაკებად.

აირის იონიზაცია ხდება მოლეკულის ან ატომის კუთვნილი ერთი ან ორი გარე ელექტრონის ამოვარდნით. ატომი, რომელსაც ერთი ან ორი ელექტრონი მოაკლდა, წარმოადგენს ერთხელ ან მრავალჯერ დამუხტულ დადებით იონს. ატომის ან მოლეკულის იონიზაციისას ამოვარდნილ ელექტრონებს შეუძლიათ მოძრაობა აირში, როგორც თავისუფალი ელექტრონების სახით, ისე აირის ნეიტრალურ ნაწილაკებთან შეხებისას შეუერთდნენ დამატებითი ელექტრონების სახით და წარმოქმნან უარყოფითი იონები.

იონიზებული აირი იღებს პლაზმის თვისებებს, როცა დამუხტული ნაწილაკების რაოდენობა მასში მიაღწევს გარკვეულ სიდიდეს ანუ იონიზაციის გარკვეული ხარისხის მერე. თუ აირის იონიზაციის ხარისხი საკმაოდ დიდია, მაშინ ხდება რაოდენობის (იგულისხმება დამუხტული ნაწილაკების რაოდენობა) გადასვლა ახალ თვისებაში – იონიზებული აირი ღებულობს ზემოთ აღწერილი პლაზმის თვისებებს.

განასხვავებენ ორი სახის პლაზმას: იზოთერმულსა და არა-იზოთერმულს. იზოთერმულ პლაზმაში, რომელიც წარმოიქმნება საკმაოდ მაღალ ტემპერატურებზე აირის გაძლიერებული თერმული იონიზაციისას, შემადგენელ ნაწილაკებს (ელექტრონები, იონები, ნეიტრალური და აღზნებული ატომები და მოლეკულები) საშუალო კინეტიკური ენერგია თანაბარი აქვთ. გარე არესთან თბური წონასწორობისას იზოთერმულ პლაზმას შეუძლია იარსებოს განუსაზღვრელად დიდხანს. იზოთერმული წონასწორობიანი პლაზმა სამყაროში გვხვდება მზისა და ვარსკვლავების სახით. მათ ეწოდებათ „ცხელი პლაზმა“. ცხელი პლაზმის იონიზაციის ხარისხი ახლოსაა 1-თან, ხოლო მისი ტემპერატურა ასობით ათას გრადუსს აჭარბებს. დედამიწის პირობებში პლაზმის ზომები ყოველთვის ძლიერაა შეზღუდული (კამერის კედლები, ელექტროდები და სხვ.). ამ შემთხვევაში ხდება პლაზმის იონიზებული ნაწილაკების გადასვლა მის შემომსაზღვრელ ნაწილებზე, რაც იწვევს პლაზმის მოცულობიდან მისი ენერგიის ნაწილის გატანას.

როგორც ცნობილია, ამ შემთხვევაში აუცილებლად უნდა შეიქმნას პლაზმის არაიზოთერმულობა ანუ პლაზმის შექმნილი კომპონენტების ტემპერატურული გადანაწილება. რადგან პლაზმიდან გასულ ნაწილაკებს მიაქვთ ენერგია, საჭიროა მისი მუდმივი

მცირე დროში (10^2-10^4 წმ). ეს არის ძირითადი განსხვავება არაიზოთერმულ და იზოთერმულ პლაზმებს შორის. იზოთერმული მინდობილია თავის თავზე და პრაქტიკულად შეიძლება იარსებოს განუსაზღვრელად დიდხანს.

ამჟამად ლაბორატორიულ და ტექნოლოგიურ დანადგარებზე ღებულობენ აირგანმუხტვის დაბალტემპერატურულ პლაზმას. მისი იონიზაციის ხარისხი წნევისა და ტემპერატურის მიხედვით შეადგენს 1-10 %, ხოლო ტემპერატურა მერყეობს 5000-30000 K-ის ფარგლებში).

აირგანმუხტვის პლაზმა მთლიანობაში ყოველთვის არაიზოთერმულია და არსებობა შეუძლია მხოლოდ იონიზებულ აირში ელექტრული ველის არსებობისას, რომელსაც ძალუძს დამუხტული ნაწილაკების აჩქარება. ამის წყალობით ამ ნაწილაკებს უჩნდება აირის ნეიტრალური მოლეკულებისა და ატომების იონიზების შესაძლებლობა და ამით აესებს მუხტის მატარებლების დანაკარგებს პლაზმის შემომსლუდავი დანადგარის ნაწილებზე.

7.6.2. დაბალტემპერატურული პლაზმის მიღების ხერხები

დაბალტემპერატურული პლაზმის აღზნების ყველაზე გავრცელებულ ხერხს წარმოადგენს აირში ელექტრული განმუხტვა.

გარე ზემოქმედებისაგან დაცული აირი სრულებით არ ატარებს ელექტრულ დენს და ამიტომ არაიონიზებულია. აირის იონიზაციის გამომწვევი გარე ზემოქმედებისას შესაძლებელია ორი სახის აირული განმუხტვის არსებობა.

პირველ შემთხვევაში მოქმედებს ორი პირობა: პირველი არის აირის იონიზაციის პირობა, რომელიც უზრუნველყოფს მუხტის თავისუფალი მატარებლის წარმოქმნას და მეორე – ნებისმიერი ძაბვის ელექტრული ველი, რომელიც დამუხტულ ნაწილაკებს განსაზღვრული მიმართულებით ამოძრავებს. ამ ორი პირობიდან ნებისმიერის მოსპობა იწვევს აირის გამტარობის დენის გაქრობას. ამ შემთხვევაში განმუხტვას უწოდებენ არადამოუკიდებელს.

მეორე შემთხვევაში, რომელსაც უდიდესი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, მოქმედებს მხოლოდ ერთი პირობა: არსებობს მუდმივი ან დროსა და მიმართულებით სწრაფად ცვლადი ელექტრული ველი, რომლის ძაბვის საჭირო მნიშვნელობა სჭარბობს

იმ მნიშვნელობას. რომელიც განისაზღვრება აირის პირობებით (ტემპერატურა, წნევა) და აირის შემომსაზღვრელი დანადგარის ნაწილების პირობებით. ამ შემთხვევაში წარმოქმნილ გამტარობის დენს ეძახიან დამოუკიდებელ განმუხტვას.

დამოუკიდებელი განმუხტვა იყოფა განმუხტვებად, რომლებშიც გამტარობის დენი აირგანმუხტვის პლაზმაში უშუალოდაა დაკავშირებული ელექტროდებით (კათოდი, ანოდი) გარე მკვებავი წრედის დენთან და განმუხტვებად, რომლებშიც აირში გამტარობის დენს არა აქვს გაღვანური კავშირი გარე მკვებავი წრედის დენთან.

პირველი სახის განმუხტვებისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა დენის გავლის მექანიზმში ენიჭება პროცესებს ელექტროდებზე, კერძოდ – პროცესებს კათოდზე, რომლებიც დაკავშირებულია ელექტრონების ემისიასე აირგანმუხტვის პლაზმაში. დენის და დენის სიმკვრივის დაბალი მნიშვნელობისას და კათოდის და საერთო პოტენციალების დიდი ვარდნისას წარმოიქმნება ფუფუნადი აირული განმუხტვა. დენის გაზრდა რაღაც გარკვეული მნიშვნელობის ზევით იწვევს საერთო და კათოდური პოტენციალის მკვეთრ ვარდნას, აირგანმუხტვის პლაზმის ტემპერატურის აწევას და დენის სიმკვრივის გადიდებას – წარმოიქმნება ელექტრული რკალი.

მეორე სახის განმუხტვებს მიეკუთვნება მაღალი სიხშირის განმუხტვა. პირველი სახის განმუხტვისგან განსხვავებით, მაღალი სიხშირის განმუხტვის გარე ელექტრული ველი ისე სწრაფად იცვლის თავის მიმართულებას, რომ მუხტის მატარებლები აირგანმუხტვის პლაზმაში ვერ ასწრებენ ელექტროდებზე ან განმუხტვის კამერის კედლებამდე მისვლას. აირგანმუხტვის პლაზმის დენის გამტარებლობას არა აქვს უშუალო კავშირი გარე წრედის დენთან.

აირგანმუხტვის პლაზმის განხილულ სახეებში ყველაზე მეტი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს მაღალი სიხშირისას და პირველ ყოვლისა, ელექტრორკალურს. ეს იმით აიხსნება, რომ ამჟამად აირის დიდი ხნით 3000-50000 K ტემპერატურებზე გახურებისათვის მაღალი სიხშირის და ელექტრორკალური განმუხტვები წარმოადგენს პრაქტიკულად ერთადერთს. თანაც არ არსებობს რაიმე საფუძვლიანი შეზღუდვა ელექტრული სიმძლავრის, აირის სახეობის და წნევის მიხედვით.

7.6.3. რკალი და რკალური პლანზმა

მეტალურგიულ პროცესებში დაბალტემპერატურული (რკალური) პლანზმა გვევლინება, ერთის მხრივ, ლითონის გასახურებლად და გასადნობად მოქნილად სამართავ სითბოს წყაროდ, რომელიც საშუალებას იძლევა მცირე მოცულობაში ვიქონიოთ დიდი თბური სიმძლავრე და მივიღოთ აირის მეტად მაღალი ტემპერატურა. მეორეს მხრივ, პლანზმა წარმოადგენს იმ ქიმიური და ფიზიკური რეაქციების გამააქტიურებელ საშუალებას, რომლებიც ჩვეულებრივ მეტალურგიულ პირობებში ან ძალიან ნელა მიმდინარეობს ან საერთოდ შეუძლებელია.

7.6.4. რკალური განმუხტვის ძირითადი ენერგეტიკული უბნები

რკალურ განმუხტვას ენერგეტიკული თვალსაზრისით ყოფენ სამ უბნად: ანოდურ, კათოდურ და რკალის სვეტის უბნებად. ასეთი დაყოფა შეესატყვისება პოტენციალის ნახტომისებურ ცვლილებებს თითოეულ კათოდთან. ამის მიხედვით რკალის მთლიანი სიმძლავრე შეიძლება გამოვსახოთ გამოსახულებით:

$$q_0 = U I + U_{\text{კ}} I + L_{\text{კ}} E I$$

სადაც: U და $U_{\text{კ}}$ ძაბვის კათოდური და ანოდური ვარდნაა; $L_{\text{კ}}$ – რკალის სიგრძე; E – ველის გრადიენტი რკალის სვეტში; I – დენის ძალა.

ელექტროდებთან ძაბვის ვარდნის უბნების სიგრძე ძალიან მცირეა, ხოლო მათში ველის გრადიენტებისა – დიდი. ამიტომ რკალის ენერჯის ძირითადი ნაწილი გამოიყოფა ელექტროდებთან. ან როგორც ამბობენ, ელექტროდებზე, და ის წარმოადგენს ლითონის ელექტროდების გახურებისა და გადნობის ძირითად წყაროს. კათოდური უბანი ძირითადია განმუხტვის წარმოქმნასა და ხელის შეწყობაში, როგორც პირველადი ელექტრონების წყარო. ანოდის მნიშვნელობა რკალურ განმუხტვაში მეორადია.

კათოდური ძაბვის ვარდნა არსებითად დამოკიდებულია იმ ნივთიერებათა არსებობაზე, რომლებიც გავლენას ახდენს ელექტრონების გამოსვლის მუშაობაზე; ელექტრონების გამოსვლის მუშაობის შემცირება აადვილებს კათოდიდან ელექტრონების ემისიას და მცირდება $U_{\text{კ}}$; ანუდურ ძაბვის ვარდნაზე იგივე ნივთიერებები არ ახდენენ პირდაპირ გავლენას. კათოდური და ანო-

დური ძაბვის ვარდნა დამოკიდებულია ელექტროდის თბურ მდგომარეობასა და თბოფიზიკურ თვისებებზე, რაც, ალბათ, დაკავშირებულია ელექტროდებზე რკალის საყრდენი ლაქების წარმოქმნასა და არსებობასთან.

კათოდისა და ანოდის ტემპერატურის გაზრდა იწვევს რკალის ძაბვის საგრძნობ შემცირებას, რაც შეიძლება აიხსნას ანოდისა და კათოდის შესაბამისი ძაბვების შემცირებით, ძალიან გახურებულ ან გამდნარ ლითონზე რკალის საყრდენი ლაქების წარმოქმნის უფრო ხელისშემწყობი პირობების არსებობით.

რკალური განმუხტვისას ელექტროდებთან არსებულ არეებს შორის მოთავსებულია რკალის სვეტი. სვეტის ძირითად ელექტრულ მახასიათებელს წარმოადგენს ველის ძაბვა E , რომელიც დამოკიდებულია ელექტროდებს შუა არის თბოგადაცემის პირობებზე და აიროვან არის თვისებებზე.

7.6.5. ენერგიის განაწილება რკალური განმუხტვის უბნებს შორის

ანოდზე გამოყოფილი ენერგია შედგება: ელექტრონების კინეტიკური ენერგიისაგან $U_e I$, რომელსაც ისინი დებულობენ ძაბვის ანოდური დაცემის არეში; ელექტრონების პოტენციური ენერგიისაგან, რომელიც ელექტრონების გამოსვლის ეფექტური მუშაობის (G) ტოლია ელექტრონების კინეტიკური ენერგიისა, რომელსაც ისინი იძენენ რკალის სვეტში და უდრის $3KT/2$. ამრიგად,

$$W_e = U_e I + (G + 3KT/2)I$$

ეს სიმძლავრე მთლიანად იხარჯება ანოდის მასალის გახურებაზე, გადნობასა და აორთქლებაზე (დანახარჯები რადიაციაზე მხედველობაში არ არის მიღებული).

კათოდი დებულობს ენერგიას იონების კინეტიკური ენერგიების $(1-f)U_n I$ და მათი ნეიტრალიზაციის ენერგიების $(1-f)(U_n - G)I$ სახით. ამრიგად, კათოდზე გამოიყოფა სიმძლავრე

$$W_k = (1-f)(U_n + U_n - G)I$$

სადაც f ელექტრონული დენის წილია; U_n – იონიზაციის პოტენციული; ამავე დროს კათოდზე იხარჯება ენერგია ელექტროდების ემისიაზე fGI . მაშასადამე, კათოდის მასალის გახურებაზე, გადნობასა და აორთქლებაზე იხარჯება სიმძლავრე

$$W_k = (1-f)(U_n + U_n)I - fGI$$

რკალის სვეტში გამოიყოფა სიმძლავრე

$$W_{\text{ს}} = L_{\text{კ}} EI$$

და იგი გაიცემა გამოსხივებით, კონვექციით და თბოგამტარობით.

7.6.6. პლაზმური (შეკუმშული) რკალი

რკალის სვეტის ტემპერატურა და მისი დენგამტარი ნაწილის რადიუსი იცვლება გარე პირობების შეცვლით (მოცემული დენის ძალისას) იმგვარად, რომ სრულდება რკალის სვეტში ველის ძაბვის მინიმუმის პირობა. ამგვარად, რკალის სვეტის რადიუსის ან სიგრძის შემცირებას (მაგალითად, გამაცივებელი კედლებით ან გამაცივებელი აირებით შებერვით, წყლის ჭაღვლების და ა.შ. საშუალებით) მიეყვართ ტემპერატურის ავტომატურ აწევამდე, სვეტში მუხტების მატარებლების რაოდენობის გაზრდის წყალობით. ამ გზით რკალი ეწინააღმდეგება ველის ძაბვის მომატებას. ამიტომ პლაზმურ (შეკუმშულ) რკალში ტემპერატურა უფრო მაღალია, ვიდრე თავისუფლად ანთებულში (ერთი და იგივე დენის პირობებში), ანდა ერთი და იგივე ტემპერატურა შეკუმშულ რკალში მიიღება უფრო დაბალი დენის პირობებში.

მაღალი ტემპერატურის რკალურ განმუხტვაში, ეტყობა, აირი უფრო იონიზებული იქნება და მაშასადამე, აირის მდგომარეობა ახლოს იქნება პლაზმურ მდგომარეობასთან (აქედანაა სახელწოდებაც „პლაზმური რკალი“).

7.6.7. პლაზმურ-რკალური ღუმელები

ძირითადი პროცესები, რომლებმაც კონსტრუქციულ დაგეგმვას და საწარმოო ან ნახევრადსაწარმოო ღუმელების შექმნას ჩაუყარა საფუძველი, არის: 1. სახარჯი ელექტროდების ან ნაჭროვანი მასალების გადადნობა წყლით საცივებელ კრისტალიზატორებში (ნახევრად უწყვეტი პროცესი); 2. კერამიკის ტიგელიან ღუმელებში საკაზმე მასალების დნობა; 3. საკაზმე მასალების ინდუქციური დნობა დამატებითი პლაზმური გახურებით (პერიოდული პროცესი).

პლაზმური რკალური ღუმელები მუშაობს მცირე (100–300 მმ Hg) ან მომატებული (რამოდენიმე ატმოსფერო) წნევისას ღუმელის კამერაში.

7.6.8. დაბალი წნევის პლაზმურ-რკალური ღუმელები

მათ აქვთ სპეციალური კონსტრუქციის კათოდური კვანძი ღრუ მილის სახით (ჩვეულებრივ ტიტანისაგან დამზადებული), რომელიც დაბალი წნევის რკალურ განმუხტვას უზრუნველყოფს, ღუმელის კამერაში იქმნება $10-10^3$ მმ Hg წნევა. არგონის ხარჯი ერთობ მცირეა (20 ლ/სთ და უფრო ნაკლები). განმუხტვა წარმოებს მუდმივი დენის დაბალ ძაბვაზე (25-80 ვ), რომელიც მოდებულია კათოდსა და გადასადნობ ლითონს (ანოდს) შორის. კათოდის მაღალი ტემპერატურა, რომელიც საჭიროა განმუხტვის უზრუნველსაყოფად, თავიდან მიიღწევა სპეციალური დამხმარე დანადგარებით, შემდეგ კი მისი გახურება წარმოებს თერმოელექტრონული ემისიით და იმ იონების დაბომბვით, რომლებიც რკალური განმუხტვისას წარმოიქმნებიან.

დაბალი წნევის პლაზმურ-რკალურ ღუმელებს ის უპირატესობა აქვთ ელექტრონულ-სხივურ ღუმელებთან შედარებით, რომ მათ მუშაობისათვის სჭირდებათ დაბალი ძაბვა, რაც შეიძლება მიღებულ იქნეს სტანდარტული ელექტრონული წყაროებიდან და კიდევ, მათ მუშაობაში სჭირდებათ უფრო ნაკლები ვაკუუმი, რაც თავის მხრივ მოითხოვს მარტივ სატუმბ სისტემებს.

კერამიკის ტიგელიანი ღუმელი პლაზმური დნობისათვის პერიოდული მოქმედებისაა. მას აქვს კერამიკის ამონაგი, ერთი ან რამდენიმე ვერტიკალურად განლაგებული პლაზმატრონი და ქვედის (უპირატესად სპილენძის წყლით საცივებელი) ელექტროდი ანუ ანოდი. კერამიკის ტიგელიანი ღუმელები განსაკუთრებით გამოსადეგია დიდი წონის (30-50 ტ) მაღალხარისხოვანი სხმულების მისაღებად.

ასეთი ღუმელები დიდი წარმადობისაა. მაგალითად, 100 კეტ სიმძლავრის ღუმელების დნობის ხანგრძლივობა 20 კგ მზა ლითონის მისაღებად 15-20 წუთია, 1-1,2 კეტ/კგ ენერჯის ხვედრითი ხარჯით.

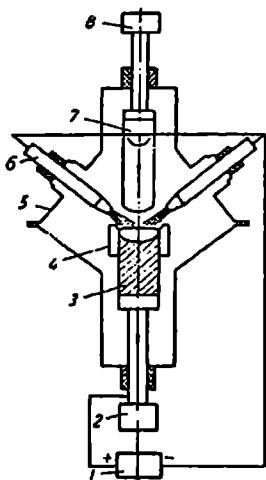
პლაზმური ინდუქციური ღუმელი. ამ შემთხვევაში პლაზმა გამოიყენება, როგორც სითბოს დამხმარე წყარო. საერთო თბური ბალანსიდან (200 კეტ ღუმელისათვის) სიმძლავრის 35 % მოდის პლაზმურ რკალზე და 65 % - ინდუქტორზე. 400 კეტ ღუმელისთვის ეს შეფარდებაა 1:1. ამ ღუმელში, რომელიც მუდმივ დენზე მუშაობს (ფირმა „დაიდო სტილ კო“) მაქსიმალური დენია 2300 ა. არგონის ხარჯი დამოკიდებულია დენის ძალაზე და $I=1000$ ა დენის პირობებში ტოლია 5-6 მ³/სთ. ამონაგი ჩვეულებრივი ინდუქციური

ღუმელისაა. პლაზმის გამოყენება საგრძნობლად ადიდებს ღუმელის წარმადობას. განსაკუთრებით მცირდება კაზმის დნობის ხანგრძლივობა. შესაძლებელია წიღების გამოყენებაც, რადგან პლაზმა მას კარგად ახურებს, ინდუქციური დენი კარგად ურევს ლითონს და ამიტომ ხდება კარგი დახალასება.

7.6.9. პლაზმურ-რკალური გადადნობის პროცესის ტექნოლოგიური სქემა

პლაზმურ-რკალური გადადნობის მოწყობილობის მუშაობის პრინციპული სქემა მოყვანილია 7.7. სურათზე. ეს სქემა დამუშავებულია უკრაინის მეცნიერებათა აკადემიის პატონის სახელობის ელექტროშედულების ინსტიტუტში (ასეთივე სქემა, მხოლოდ ელექტროდის პორიზონტალური მიწოდებით, შემუშავებული აქვს სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის ბაიკოვის სახელობის მეტალურიის ინსტიტუტს. პლაზმატრონი ამ შემთხვევაში ვერტიკალურად დგას).

გადასადნობი ნამზადი (7), ორი ან რამდენიმე პლაზმატრონი (6), სპილენძის წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი (4) და გადადნობის შედეგად მიღებული სხმული (3) მოთავსებულია



სურ. 7.7. პლაზმურ-რკალური გადადნობის მოწყობილობის პრინციპული სქემა

1. მუდმივი ან ცვლადი დენის წყარო; 2. გამომტანი მექანიზმი; 3. სხმული;
4. წყლით საცივებელი კრისტალიზატორი; 5. პერმეტული კამერა;
6. პლაზმატრონი; 7. გადასადნობი ნამზადი; 8. მიმწოდებელი მექანიზმი.

დასმულ კამერაში (5). მუდმივი ან ცვლადი დენის წყარო (1) მიერთებულია შესაბამისი გამშვებ-მარეგულირებელი ხელსაწყოებით პლანმატრონთან და სხმულთან. თანაც, თუ გამოიყენება მუდმივი დენი, მაშინ უარყოფითი ბოლო მიუერთდება პლანმატრონს, დადებითი – სხმულს. თითოეული პლანმატრონის პლანმური ნაკადი მიმართულია კრისტალიზატორში მყოფ თხევად ლითონზე. ნამზადი სპეციალური მექანიზმის (8) საშუალებით გადაადგილდება ზევიდან ქვევით და იმავდროულად ბრუნავს საკუთარი ღერძის გარშემო. პლანმურ ნაკადებთან შეხებისას ის დნება და წვეთწვეთობით ჩადის აბაზანაში. აბაზანის აესებასთან ერთად მექანიზმით (2) იწყება სხმულის გამოწვევა. (2) და (8) მექანიზმების შეთანხმებული მუშაობა უზრუნველყოფს გადადნობის უწყვეტ პროცესს. პლანმატრონები განლაგებულია რადიალურად სხმულის ირგვლივ და შეუძლია გადაადგილება კამერაში ჩატანებულ შემამჭიდროებლებში, რაც საშუალებას იძლევა პლანმური ნაკადი მიემართოს აბაზანის ყოველ წერტილში. რამდენიმე პლანმატრონის გამოყენება საშუალებას იძლევა გავანაწილოთ თბური დატვირთვა აბაზანაზე.

მოცემული სქემა საშუალებას იძლევა გადავადნოთ ლითონი ისე, რომ არ მივუერთოთ ელექტრული წყარო ნამზადს. თუ ნამზადს მივუერთებთ დენის წყაროს დადებით პოლუსს, მაშინ პლანმური ნაკადები ინთებიან აბაზანას და ნამზადს შორის ექვიპოტენციალურ შუალედში. ამით შეიძლება 15–20 % გადავიყვანოთ ანოდური დენის ნამზადზე.

მოცემული სქემა, აბაზანის გახურების გადანაწილების შესაძლებლობის გამო, საშუალებას იძლევა მივიღოთ ბრტყელი და თხელი ლითონური აბაზანა, გადასადნობი ლითონის თბოგადაცემისა და სხმულის დიამეტრისგან დამოუკიდებლად. ეს, თავის მხრივ, ხელს უწყობს ისეთი მკვრივი სხმულის მიღებას, რომელსაც არ ექნება ტოლღერძა კრისტალები და ჩაჯდომის სიფხვიერე ზედა ნაწილში. გამოდნობილ სხმულებში არ არის ჩაჯდომის სიცარიელე.

აბაზანის ბრტყელი ფორმა სხმულის კრისტალიზაციისას ხელს უწყობს მყარი და თხევადი არალითონური ჩანართების განდევნას თხევად აბაზანაში. ეს განდევნა ხდება გამყარებული ლითონის ზედაპირის გადაადგილებით. ამის შედეგად გადადნობილი ლითონი გამოდის სუფთა, ერთგვაროვანი ქიმიური შედგენილობით და მკვრივი სხმული, როგორც განივ, ისე გრძივ კვეთში.

მოცემული სქემა საშუალებას იძლევა გადადნეს მასიური ნამზადები, ყველანაირი ფორმისა და ზედაპირის ნაჭრები. ამ

შემთხვევაში სხმულის და ნამზადის კეფოების ფარდობა შეიძლება იცვლებოდეს დიდ ფარგლებში.

საერთოდ. გადადნობისას ხმარობენ ნამზადებს, რომელთა განიკეფეთის ფართობია სხმულის ფართობის 0,7-0,8. რაც უფრო უახლოვდება ნამზადის დიამეტრი სხმულისას, მით მეტია ღუმელის თბური მოქმედების სასარგებლო კოეფიციენტი. გადადნობისას საჭიროა შევეცადოთ, რომ ღრწო გადასადნობი ნამზადის შევლობილ ბოლოს და ლითონის თხევად ზედაპირს შორის იყოს რაც შეიძლება მცირე. ეს ამცირებს თბურ დანაკარგებს გამოსხივებაზე, რითაც უფრო სრულად გამოიყენება პლაზმური ნაკადის სითბო.

არგონის პლაზმაზე მარგი ქმედების კოეფიციენტი აღწევს 40-45 %-ს. თუ პლაზმის შემქმნელ აირად გამოვიყენებთ არგონის ნარევს აზოტთან ან წყალბადთან, მაშინ მ.კ.ი. იზრდება 65 %-მდე.

რადგან გადასადნობი ნამზადი ფარავს თხევადი აბაზანის თითქმის მთელ ზედაპირს და საგრძნობლად ზღუდავს თბურ გამოსხივებას აბაზანიდან, თბური დანაკარგები ღუმელის კედლების გახურებაზე შეადგენს მხოლოდ 15-20 %-ს. აზოტის ან წყალბადის დამატება არგონში კიდევ უფრო ამცირებს ამ დანაკარგებს, რადგან პლაზმის ტემპერატურა ეცემა და შესაბამისად მცირდება დანაკარგები გამოსხივებაზე.

რადიალური პლაზმატრონების გამოყენებით შესაძლებელია აბაზანის ყველა წერტილის გახურება. ამიტომ ამ პირობებში ერთსადა იმავე ღუმელზე შესაძლებელია გამოიღნეს ყველა პროფილის სხმული. ამისათვის მარტო კრისტალიზატორის გამოცვლაა საჭირო.

7.6.10. პლაზმურ-რკალური გადადნობის პროცესი

ლითონის გადადნობა კრისტალიზატორიან პლაზმურ-რკალურ ღუმელში შემდეგნაირად ხდება. ნამზადს უშვებენ ქვევით, სპილენძის წყლით საცივებელ ფალიასთან შეხებამდე; შემდეგ რიგრიგობით რთავენ ყველა პლაზმატრონს. პლაზმატრონების შემობრუნების მექანიზმებით აყენებენ მათ ისე, რომ პლაზმურმა ნაკადებმა ჩამოაჭრან ნამზადის ბოლოს პატარა ნაჭერი. შემდეგ ნამზადს ოდნავ ასწევენ, ფალიაზე დარჩენილი ნამზადის ჩამონაჭერს ადნობენ და ცოტა ხნით აყოფენებენ დახალასებისათვის. თხევადი ლითონის დამუშავების შემდეგ რთავენ ნამზადის დასაწევ მექანიზმს. კრისტალიზატორში თხევადი ლითონის გარკვეული

დონის დამყარებიდან პროცესი გადაიქცა მუდმივ (სტაციონარულ) რეჟიმში, რომელიც ან ხელით ან ავტომატებით ხორციელდება. დნობის დამყარებული რეჟიმისას ნამზადის ნადნობის წონა რიცხოვნად ტოლია სხმულის კრისტალიზაციის სიჩქარისა.

ნამზადის თანაბარი შემოდნობისათვის მას აბრუნებენ. ნამზადი დნება პლასმური ჩირაღდნის სითბოს გავლენით, რომელიც გადაეცემა კონვექციით და გამოსხივებით. მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ნამზადს მიაერთებენ მუდმივი დენის პლასმატრონების კვების წყაროზე, სითბოს აღნიშნულ ნაკადს ემატება ანოდზე გაბნეული ენერგია. ნამზადზე კონვექციური და რადიაციული სითბოს გადაცემა ხდება არა მარტო პლასმური ჩირაღდნიდან, არამედ აბაზანის თხევადი ლითონის ზედაპირიდან და ამ ზედაპირიდან პლასმური ნაკადის არეკვლით. ამრიგად, ნამზადის ბოლოს მიეწოდება სითბოს უამრავი რაოდენობა.

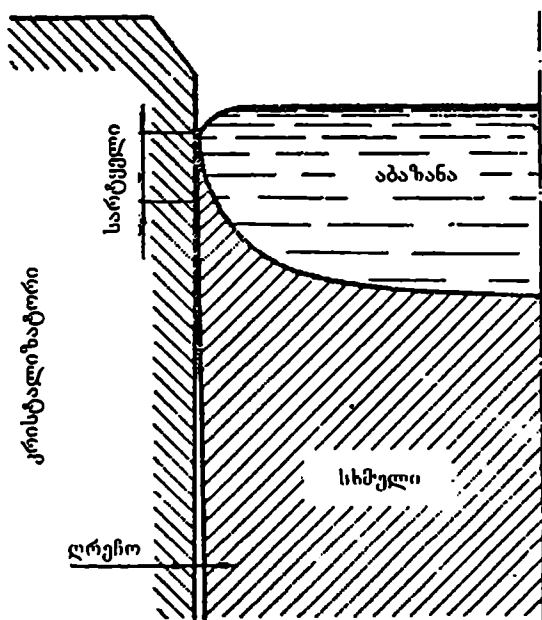
7.6.11. თხევადი ლითონის აბაზანა პლასმურ-რკალური გადადნობისას

მართალია, თხევადი ლითონიდან სხმულის გამყარების პროცესი წყლით საცივებელ სპილენძის კრისტალიზატორში ძირფესვიანადაა შესწავლილი უწყვეტი ჩამოსხმისას, მაგრამ პლასმურ-რკალური გადადნობისას სხმულის კრისტალიზაციას მთელი რიგი თავისებურებანი ახლავს, ამიტომ ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისას ლითონის კრისტალიზაციის, და მით უმეტეს, უწყვეტი ჩამოსხმის შესწავლის შედეგები არ შეიძლება გამოდგეს ლითონთა და შენადნობთა პლასმურ-რკალური მეთოდისათვის. პლასმურ-რკალური გადადნობისას ლითონური აბაზანა გაცილებით უფრო მეტად ხურდება, ვიდრე ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისას და ამიტომაც ლითონის ზედაპირი ამ შემთხვევაში გადახურდება. პლასმურ-რკალური გადადნობის სხმულის ის ნაწილი, რომელიც გამოდის კრისტალიზატორიდან, ციედება არა მარტო გამოსხივებით, როგორც ეს ხდება ვაკუუმურ კამერაში, არამედ თბოგადაცემითაც.

პლასმურ-რკალური გადადნობის ხერხს ანალოგებთან შედარებით გარდა განმასხვავებელი ნიშნებისა. საერთო თვისებებიც აქვს. მაგალითად, სითბოს გადაცემა თხევადი ლითონის აბაზანიდან კრისტალიზატორის კედელზე ხორციელდება გამაცივებელი სარტყლით. იმის გამო, რომ პლასმურ-რკალური გადადნობისას აირების ატმოსფეროში ლითონთა აორთქლება პრაქტიკულად

გამორიცხულია და კრისტალიზატორის შიდა ზედაპირი. რომელიც თხევად ლითონთანაა შეხებაში, სუფთაა ლითონური ანაორთქლებებისაგან. კრისტალიზატორის კედლის ზედაპირზე ყოველთვის შეინიშნება თხევადი ლითონის არადასველებადი მენისკი და აბაზანის ზედა შემოხაზულობა – მისი სარკე, რომელიც ყოველთვის ამობურცულად მოჩანს.

არადასველებადობის კუთხის წვეროში, როგორც ცნობილია, არის წერტილი, რომელშიც ერთდროულად არსებობს სამივე ფაზა: თხევადი, მყარი, აირადი. აქ ხდება სხმულის განსახილველი პორიზონტალის პირველი მყარი ფაზის კრისტალების ჩასახევა. გამყარებული ლითონის ქერქის სისქე ანუ გარნისაჟული ფენა თხევადი ფაზის კრისტალიზატორის ციფ კედელთან შეხების დროის გაზრდით მსხვილდება. გარნისაჟული ფენა მჭიდროდ ედება კრისტალიზატორის კედელს და სხმულის მთელ გარშემოწერილობაზე წარმოქმნის სარტყელს. ამ შეხების სარტყელის საშუალებით გადადის სითბოს ძირითადი რაოდენობა აბაზანიდან კრისტალიზატორში. სიმძლავრის გაზრდით სარტყლის ფართობი შესაბამისად იზრდება და იზრდება თბური ნაკადი კრისტალიზატორში.



სურ. 7.8. თხევადი ლითონის აბაზანის და სხმულის ფორმირების სქემა წყლით საცივებელ კრისტალიზატორში

გარნისაუული სარტყელას სისქეს, რომელიც განსაზღვრავს მის სიმტკიცეს. დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სხმულის ხარისხიანი ზედაპირის მისაღებად. ლითონის ქერქის მცირე, არასაკმარისი სიმტკიცისას და მისი კრისტალიზატორის კედელთან შეჭიდებისას, შესაძლებელია მისი გაწყვეტა. გაწყვეტის ადგილში გამოევა თხევადი ლითონი და სხმულის ზედაპირზე გაჩნდება ნალენთები. ამ თვალსაზრისით არის სწორედ საჭირო არადასველებადი მენისკი, რომელიც ამცირებს კრისტალიზატორის კედელთან ლითონის ქერქის შეჭიდების ალბათობას.

სხმულის გამყარებასთან ერთად, ჩაჯდომის გაელენით, სხმულის დიამეტრი მცირდება და სხმულსა და კრისტალიზატორს შორის წარმოიქმნება ღრეჩო. ღრეჩოს წარმოქმნასთან ერთად, რასაკვირველია, მკვეთრად ეცემა თბოგადაცემა სხმულიდან კრისტალიზატორზე. ღრეჩოს სიმცირის გამო თბოგადაცემა მისგან ძირითადად ხორციელდება აირის თბოგამტარობის ხარჯზე. კონვექციისა და გამოსხივების მონაწილეობა თბოგადაცემაში ძალიან მცირეა. ამიტომ გადადნობა აირების ნარევებში, სხვა დადებითი თვისებების გარდა, ხელსაყრელია აგრეთვე აბაზანიდან სხმულში სითბოს გადაცემის პირობების გაუმჯობესების თვალსაზრისით. სითბოს გადაცემის პირობები უმჯობესდება იმის გამო, რომ სხმული ცივდება როგორც კრისტალიზატორში, ასევე მის გარეთაც.

ლითონური აბაზანის ქვედა ნაწილის მოხაზულობას დიდი მნიშვნელობა აქვს სხმულის მაკროსტრუქტურისათვის. იმისათვის, რომ მივიღოთ სხმული თანადერძული კრისტალებით არაორიენტირებული კრისტალების გარეშე, აუცილებელია გექონდეს ლითონური აბაზანის ბრტყელი ფორმა. ხოლო სხმულის ზედა ნაწილში ჩაჯდომის სიცარიელის მოსასპობად საჭიროა თხელი აბაზანის არსებობა.

პლაზმურ-რკალური გადადნობისას ლითონური აბაზანის ბრტყელი ფორმა დამოკიდებულია პლაზმატრონების რაოდენობაზე, რომლებიც ახურებენ აბაზანას; მათ განლაგებაზე; გადადნობის სიჩქარესა და პლაზმატრონების სიმძლავრეზე. სიმძლავრის გაზრდით აბაზანის ძირი იღებს ბრტყელ ფორმას. ამასთან, მისი სიღრმე უცვლელი რჩება. კრისტალიზატორიდან სხმულის გამოწვევის სიჩქარის გაზრდა პირიქით, ზრდის აბაზანის სიღრმეს და მისი ბრტყელი მოხაზულობა იცვლება კონუსურით.

7.6.12. პლაზმურ-რკალური გადადნობის სხმული

წყლით საცივებელ სპილენძის კრისტალიზატორში ლითონის გადადნობის ყველა პროცესისას სხმულის ზრდა მიმდინარეობს იძულებით მიმართული კრისტალიზაციის პირობებში, მუდმივი, დროში უცვლელი, დადებითი ტემპერატურული გრადიენტით კრისტალიზაციის სიბრტყესთან. ამასთან, იზღუდება ის პროცესები, რომელთა შედეგადაც სხმულში წარმოიქმნება მაკროლიკვაციური არეები. ამის შედეგად შენადნობთა სხმულები მიიღება ქიმიურად და ფიზიკურად უფრო ერთგვაროვანი, ვიდრე თუჯის ბოყვებში ჩამოსხმული ზოდები.

მიუხედავად ამისა, კრისტალიზატორიანი გადასადნობი ღუმელებით მიღებულ სხმულებში შეიძლება გაჩნდეს ქიმიური არაერთგვაროვნების არეები. არჩევენ ასეთი არაერთგვაროვნების წარმოქმნის შემდეგ სამ მიზეზს:

1. კომპონენტების ან მინარევების არაერთგვაროვანი განაწილება გადასადნობ ნამზადში;

2. სხმულის ქიმიური შედგენილობის არაერთგვაროვნება, რომელიც მიიღება შენადნობის მინარევებისა და მალეგირებული ელემენტების არჩევითი აორთქლების შედეგად;

3. სხმულის არაერთგვაროვნება, რომელიც წარმოიქმნება ქიმიურად ჰომოგენური შენადნობის კრისტალიზაციის პროცესში.

პირველი სახის არაერთგვაროვნება წარმოიქმნება დაწნეხილი ნამზადის გადადნობისას, როცა ნამზადის კაზმის ქიმიური შედგენილობა კარგად არ არის გასაშუალებული. ასეთი სახის არაერთგვაროვნება დამახასიათებელია ტიტანის შენადნობთა სხმულებისათვის მათი ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისას.

მეორე სახის არაერთგვაროვნება მულაენდება იმ გადადნობის პროცესებში, რომლებიც მიმდინარეობს ლითონური შენადნობიდან ადვილდნობადი ელემენტების აორთქლებით.

პლაზმურ-რკალური გადადნობისას აირის ატმოსფეროში პრაქტიკულად გამორიცხულია მალეგირებული ელემენტების აორთქლება თხევადი ლითონიდან. ამის შედეგად ისობა სხმულის ქიმიური არაერთგვაროვნების ეს სახე არაერთგვაროვნება მულაენდება მხოლოდ ფერადი ლითონებით (Mg, Zn, Pb) მიკროლეგირებისას, ნიკელისა და მისი შენადნობების ფლუსის (მდნობის) გარეშე გადადნობისას.

მესამე სახის ქიმიური მაკრო-არაერთგვაროვნება დაკავშირებულია სხმულის კრისტალიზაციის პროცესთან და შეინიშნება ყველა სხმულში, რომლებიც მიიღება თანდათანობითი გაცივებით.

წყლით საცივებელ კრისტალიზატორიან პლაზმურ-რკალურ ღუმელსა და ზონური დნობის ლითონის სხმულების კრისტალიზაციის პროცესებს შორის არსებობს მსგავსება. როგორც ზონური დნობისას, აქაც შეიძლება შეინიშნოს რომელიმე ელემენტის შემცველობის შემცირება სხმულის ქვედა ნაწილში და გაზრდა ზედაში. შემცირების და გაზრდის ზონების სიგანე დამოკიდებულია თხევადი ლითონის აბაზანის სიღრმეზე. პლაზმურ-რკალური გადადნობა ხასიათდება გამდნარი ლითონის პატარა სიღრმით. ამიტომ ზონების სიგანე სულ არის სხმულის სიმაღლის 5-6 %, სხმულის სიმაღლეა 900-1000 მმ.

პლაზმურ-რკალური გადადნობის სხმულებში არსევენ მარტორ სტრუქტურულ არეს: წერილი კრისტალების პერიფერიულ არეს და შედარებით მსხვილი, მკაცრად მიმართული კრისტალების ნეიტრალურ არეს. დნობის სწორად შერჩეული რეჟიმისას არ არის ტოლღერძა კრისტალების არე სხმულის ღერძულ ნაწილში. სხმულის მხოლოდ დიდი სისწრაფით გამოიწვეისას, თუ პლაზმორტონების სიმძლავრე არასაკმარისია, სხმულებში შეიძლება მესამე სტრუქტურული არის წარმოქმნა.

სხმულის მსხვილი კრისტალების ზრდის მიმართულება მთლიანად განისაზღვრება ლითონური აბაზანის ძირის მოხაზულობით. ძირის ბრტყელი მოხაზულობისას კრისტალიტების ღერძები ვერტიკალიდან 5-10°-ით გადაიხრება. ცენტრალური არის მსხვილი კრისტალიტები იჭერს სხმულის თითქმის მთელ მოცულობას. პერიფერიული არის სიგანე შეადგენს 5-10 მმ-ს და სხმულის დიამეტრის გაზრდა მასზე უმნიშვნელოდ მოქმედებს.

პლაზმურ-რკალური გადადნობის სხმულებში თითქმის არ არის ღერძული სიფხვიერე. პერიფერიული და ცენტრალური არეების სიმკვრივე ერთნაირია და 0,25-0,1 %-ით უფრო მეტია, ვიდრე გაგლინული ნამზადებისა.

პლაზმურ-რკალურ ღუმელში გამოდნობილი სხმულების ზედაპირი მაღალი ხარისხისაა და გაგლინვის წინ არ საჭიროებს გასუფთავებას.

7.6.13. პლაზმურ-რკალური დნობის პროცესში ელექტროდზე და აბაზანაში მიმდინარე რეაქციების კინეტიკა და თერმოდინამიკა

როგორც წესი, ყოველ მეტალურგიულ პროცესში შეიძლება გამოიყოს სტადიები ან პერიოდები, რეაქციის ერთმანეთისაგან

განსხვავებული მიმდინარეობის ფიზიკურ-ქიმიური პირობებით ან თვით რეაქციებითაც კი. მაგალითად, მარტენის პროცესს ყოფენ ჩატვირთვის და კაზმის დნობის, ლითონის დახალასების, მისი საბოლოო ქიმიურ შემადგენლობამდე დაყვანისა და განუანგვის პერიოდებად. ჩვეულებრივი ელექტრომეტალურგია იყოფა ჩატვირთვის, გადნობის, დაჟანგვის, აღდგენის, დახალასების პერიოდებად. ღუმელში კონცენტრაციული, ტემპერატურული და სხვა პირობების შეცვლით ამ ცალკეულ პერიოდებში ცდილობენ სხვადასხვა რეაქციების (ნახშირბადის დაჟანგვის, განგოგირდების, განუანგვის, ფოსფორის დაჟანგვისა და სხვ.) ჩატარებას. რომლების საშუალებითაც გამოშვების წინ იღებენ ლითონის სასურველ შედგენილობას.

ამის მსგავსად, პლაზმურ-რკალური დნობისას კერამიკულ ტიგელიან ღუმელებში შეიძლება საუბარი სულ ცოტა ორ პერიოდზე: კაზმის გადნობასა და ლითონის დახალასებაზე. თუ პერიოდული პროცესებისას (მარტენი, ელექტროღუმელი და სხვ.) პერიოდები ერთმანეთს ენაცვლება დროში, ხოლო მათი ხანგრძლივობა და ფიზიკურ-ქიმიური პირობები ყოველ პერიოდში შედარებით ადვილად წესრიგდება ფართო ზღვრებში, არაწყვეტილი (ნახევრადწყვეტილი) პროცესებისას სხვადასხვა პერიოდები დროში ერთმანეთს ემთხვევა, თუმცა მიმდინარეობს სხვადასხვა სივრცეში (ერთდროულად მიმდინარეობს მეტალურგიული დანადგარის სხვადასხვა ადგილას) და მათი განცალკევებული მოწესრიგება ან ძალზე შეზღუდულია. ან სრულებით შეუძლებელია.

სახარჯელექტროდებიანი პლაზმურ-რკალური გადადნობისას, ისევე, როგორც სხვა გადადნობითი (ელექტროწიდური, ვაკუუმურ-რკალური) პროცესებისას, ძირითად პერიოდებს წარმოადგენს: ელექტროდის პერიოდი, რომელშიც შედის ელექტროდის ღლიობა წვეთში (ელექტროდის ბოლოზე მიმდინარე რეაქციებთან ერთად) და აბაზანის პერიოდი. გადადნობის პროცესის უფრო დაწვრილებითი განხილვისას შეიძლება ცალკე გამოიყოს წვეთის გადატანის პერიოდი – ელექტროდიდან აბაზანაში წვეთის გადატანისას მასში მიმავალი რეაქციები. ხოლო ლითონის სხმულის სტრუქტურის ჩამოყალიბების და ერთგვაროვნების შესწავლისას დიდი მნიშვნელობა ექნება ლითონის გამყარების პერიოდს. მასში შედის აბაზანაში კრისტალიზაციის ზედაპირზე და მის ახლოს მიმდინარე რეაქციები.

მაგრამ ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ ორ პერიოდს: ელექტროდისა და აბაზანის, რადგან პროცესისათვის სხვა პერიოდებს გადამწყვეტი მნიშვნელობა არა აქვს. ლითონის ურთიერთქმედების

დრო გარემომცველ გარემოსთან ამ პერიოდებში სხვადასხვაა. საერთოდ, ელექტროდის პერიოდის ხანგრძლივობა მთელი თანრიგით (ათჯერ და მეტად) უფრო მცირეა, ვიდრე აბაზანის პერიოდისა. მიუხედავად ამისა, არ შეიძლება დაეასკენათ, რომ აბაზანაში უმთავრესად რეაქციები მიმდინარეობს, რადგან რეაქციები მიმდინარეობს განსხვავებულ პირობებში განსხვავებული სიჩქარით. მართლაც, ფიზიკურ-ქიმიური პირობები ელექტროდებზე და აბაზანაში შეიძლება საგრძნობლად განსხვავდებოდეს – ერთი პერიოდისგან მეორეში გადასვლისას რეაქციები შეიძლება გაძლიერდეს, ჩაქრეს ან სულაც შეიცვალოს მიმართულება კონცენტრაციის, ტემპერატურული და მასის გადატანის პირობების მიხედვით. მაგალითად, ინერტულ ატმოსფეროში ფოლადის გადნობისას არალითონური ჩანარები ელექტროდის პერიოდში ნაწილობრივ გამოიდევენება ლითონი-აირის ზედაპირზე და ნაწილობრივ იხსნება ლითონში, მაგრამ აბაზანაში, გამყარების ზედაპირის ახლოს, ტემპერატურის დაწვეასთან ერთად ხსნადობის შემცირების გამო, იწყებს ხსნარიდან გამოყოფას. თუმცა აბაზანიდან ჩანარების გამოდევნა (ამოტივტივება) ძალიან ძნელია.

ერთსა და იმავე პერიოდშიც კი, მაგრამ ღუმელის სხვადასხვა ადგილში, რეაქციები შეიძლება საწინააღმდეგოდ წავიდეს. მაგალითად, აბაზანის ზედაპირთან ლითონის ურთიერთქმედება აირთან, პლაზმური ნაკადის უშუალო მოქმედების ახლოს, შეიძლება წავიდეს აირის შთანთქმით, მაშინ, როცა აბაზანის ზედაპირის სხვა ადგილებში მოხდეს მისი დესორბცია.

თითოეული პერიოდის წვლილი ლითონის ქიმიური შედგენილობის ცვლილებაში დამოკიდებულია პროცესის სახესა და მისი წარმართვის პირობებზე. მაგალითად, უანგეულების ჩანარების მოცილება, მათი სწრაფი გახსნის გამო, პრაქტიკულად მთავრდება ელექტროდზე, ხოლო განგოგირდება, რომელიც ხორციელდება წიდით, მიდის მარტო აბაზანაში, რადგან წიდა მიეწოდება პირდაპირ აბაზანას და ელექტროდთან შეხებაში არ შედის. ამავე დროს აირის ფაზასთან ურთიერთქმედება შესაძლებელია როგორც ელექტროდზე, ასევე აბაზანასთან.

მრავალრიცხოვანი ცდები გვიჩვენებს, რომ უწყვეტი მეტალურგიული პროცესებისას რეაქციები არ მიდის წონასწორულ მდგომარეობამდე და მათი მიმდინარეობის სისრულე დამოკიდებულია რეაქციის სიჩქარესა და რეაგენტების ურთიერთქმედების ხანგრძლივობაზე (ურთიერთმოქმედი ფაზების შეხების ხანგრძლივობაზე). ამრიგად, დნობის შედეგები დამოკიდებულია რეაქციების კინეტიკაზე და ამის ცოდნა ძირითადია პროცესის მართვისათვის.

7.6.14. პლაზმურ-რკალური დნობის საწყისი კინეტიკური განტოლებანი

ნებისმიერი პეტროგენული რეაქცია შედგება რამდენიმე რგოლისაგან: რეაგენტების მიყვანა რეაქციის ადგილთან, თვით რეაქცია (მოლეკულების წარმოქმნა და დაშლა), რეაქციის პროდუქტების მოცილება და სხვ. რეაქციის სიჩქარე განისაზღვრება მისი ყველაზე ნელი რგოლით. პირომეტალურგისათვის ასეთი რგოლია მასის გადატანა. ზემოთქმული იმის სრული საფუძველია, რომ ეს ეხება პლაზმურ-რკალური დნობის რეაქციებსაც. ამრიგად, მათი კინეტიკა დიფუზიურ უბნებში მიმდინარეობისას შეიძლება აღწერილი იქნეს პირველი ხარისხის რეაქციების განტოლებებით. ასეთი განტოლებების გამოყენებისას მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ სისტემა „ლითონი-აირი-წიდა“ ზოგადად ღიაა, ე.ი. სისტემაში იცვლება რეაგენტების მასები. ეს მასები განუწყვეტლივ შედიან სისტემაში და გადიან იქიდან. გარდა ამისა, კინეტიკურ განტოლებებს უნდა აქონდეთ განსხვავებული სახეები, რომელთა სიჩქარეც იზღუდება ლითონურ ფაზაში რეაგენტის გადატანით იმ რეაქციებისათვის და დამოკიდებულია აირიოვანი ან წილის ფაზიდან რეაგენტის გადმოტანაზე.

7.6.14.1. რეაქციები, რომლებიც იზღუდება რეაგენტების გადაადგილებით ლითონურ ფაზაში

ამ შემთხვევაში რეაქციის სიჩქარე დამოკიდებულია ლითონში რეაგენტის შემცველობაზე (კონცენტრაციაზე). ლითონში მიმდინარე რეაქციაში მონაწილე რომელიმე X ელემენტის კონცენტრაციის ცვლილება ჩაიწერება შემდეგი სახით.

$$\frac{d}{dt}(\rho V x) = \epsilon C_0 + \beta p F (C_f - X) - \epsilon_{\text{კ}} X \quad (7.3)$$

სადაც ρ და V შენადნობის სიმკვრივე და მოცულობაა;

C_0 და C_f – ელემენტის საწყისი და წონასწორული კონცენტრაციები;

ϵ და $\epsilon_{\text{კ}}$ – ლითონის დნობის და კრისტალიზაციის მასური სიჩქარეები;

F – ფაზათაშორისი ზედაპირი, რომელზეც მიდის რეაქცია;

β – მასის გადაცემის კოეფიციენტი.

(1) განტოლების მარჯვენა მხარის პირველი წევრი გვიჩვენებს ელემენტის კონცენტრაციის ცვლილებას სისტემაში მისი თხევად

ლითონთან ერთად შემოსვლისას; მეორე – ელემენტის კონცენტრაციის ცვლილებას აირთან ან წიდასთან ურთიერთქმედებისას. რეაქციის მამოძრავებელი ძალა განისაზღვრება ($C_F - X$) სხვაობით, რომელიც ახასიათებს სისტემის სიშორეს წონასწორობიდან. ბოლო წვერი გულისხმობს ელემენტის კონცენტრაციის ცვლილებას მისი მოშორებისას კრისტალიზებული ლითონით.

გაცვლითი პეტროგენული რეაქციების შემთხვევაში, როცა იცვლება ორივე ურთიერთმოქმედი ფაზის შედგენილობა, (1) განტოლება უნდა დაიწეროს ორივე ფაზისთვის და ამოიხსნეს ერთად. იმ შემთხვევაში, როცა სარეაქციო ზედაპირი არაერთგვაროვანია, ე.ი. როცა მის სხვადასხვა ნაწილში რეაქციის მსვლელობების პირობები სხვადასხვაა, (1) განტოლების მეორე წვერი უნდა იყოს იმ წვერების ჯამი, რომლებიც აღწერენ რეაქციის მსვლელობას ზედაპირის ისეთ (კალკულ ნაწილებზე, რომლებიც შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ერთგვაროვანი. ასე მაგალითად, ლითონის ურთიერთქმედება აირთან ფაზასთან, რომელიც შეიცავს აქტიურ აირს. მისი შთანთქმის უდიდესი სიჩქარე მოადის ზედაპირის აქტიურ ნაწილზე F_1 , რომელზეც მოქმედებს პლანური ნაკადი, მაშინ როცა დარჩენილი ზედაპირის F_2 ნაწილზე რეაქცია მიდის ნელა ან სულაც იცვლის ნიშანს. ამ შემთხვევაში (1) განტოლება იღებს სახეს:

$$\frac{d}{dt}(\rho V X) = g C_0 + \beta' \rho F_1 (C_F - X') + \beta'' \rho F_2 (C_F - X'') - g_{კრ} X$$

სადაც ერთი შტრიხით აღნიშნულია რეაქციის პარამეტრები F_1 ნაწილზე, ორი შტრიხით – F_2 ნაწილზე.

აღსანიშნავია, რომ მოყვანილი განტოლებები აღწერს სისტემის არამყარ მდგომარეობას, როცა მისი პარამეტრები იცვლება დროში, უახლოვდება რაღაც უკიდურეს მნიშვნელობებს, განსაზღვრულს წონასწორობული პირობებით ან პროცესის დინამიკით. დროის ნაწილს, რომლის განმავლობაშიც სისტემა იმყოფება ამგვარ მდგომარეობაში, ეწოდება გარდამავალი პერიოდი. თუ სისტემა ვერ აღწევს წონასწორობულ მდგომარეობამდე (ანუ სტაციონარულ მდგომარეობამდე), მაშინ გარდამავალი პერიოდი იჭიმება პროცესის ბოლომდე. უწყვეტი პროცესისას, ჩვეულებრივ, სწრაფად მყარდება ისეთი მდგომარეობა, როცა სისტემის პარამეტრები არ იცვლება დროში, მაგრამ სისტემა შორსაა ჭეშმარიტი წონასწორობისაგან. ამ შემთხვევაში საუბრობენ სისტემის კვაზისტაციონარულ მდგომარეობაზე. ამ მდგომარეობის პარამეტრები განისაზღვრება რეაქციის კინეტიკით გარდამავალ პერიოდში.

კვაზისტაციონარული მდგომარეობის განტოლება გამომდინ

ნარეობს კინეტიკური განტოლებებიდან, როცა $t \rightarrow \infty$ ან რეაქციის სინქარის ($dx/dt=0$) ნულთან გატოლებით კვანისტაციონარული მდგომარეობისათვის (1) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$gC_0 + \beta r F(C_0 - X) - gX = 0$$

$$\text{საიდანაც } C = X = \frac{gC_0 + \beta r F C_0}{g + \beta r F}$$

7.6.14.2. რეაქციები, რომლებიც იზღუდება აიროვანი ან წიდური ფაზიდან რეაგენტის გამოტანით.

განვიხილოთ ეს შემთხვევა ლითონის მინარევების დაჟანგვის რეაქციის მაგალითზე აირის ან წიდის ჟანგბადით, როცა დასაჟანგი ელემენტების ლითონში დიფუზიური გადატანა ყოველთვის უზღვევია და ჟანგის სინქარეს არ ზღუდავს. ამ შემთხვევაში რეაქციის სინქარე განისაზღვრება ჟანგბადის კონცენტრაციების სხვაობით მუანგავი ფაზის შუაგულში C_0 და მის ზედაპირზე C_0^* , სადაც მყარდება წონასწორობა $C_0^* = C_0^{*0}$ ამასთან, (7.3) ტოლობის მეორე წევრი ხდება მუდმივი (დამოუკიდებელი ელემენტის კონცენტრაციისაგან) და უნდა შეიცვალოს დასაჟანგი ელემენტის ნაკადით. რომელიც დამოკიდებულია მარტო ლითონის ზედაპირისკენ ჟანგბადის მიწოდების პირობებზე.

$$j_{\text{წ}} = \beta r_{\text{წ}} C_0$$

სადაც r დაჟანგვის რეაქციის სტექიომეტრიის გათვალისწინების კოეფიციენტი;

j_0 - მოცემული ელემენტის დაჟანგვაზე დახარჯული ჟანგბადის ნაკადი;

β_0 - აირულ ფაზაში ჟანგბადის მასის გადაცემის კოეფიციენტი.

ამ შემთხვევაში (1) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{d}{dt}(\rho V X) = gC_0 - j_{\text{წ}} F - h_{\text{წ}} X = gC_0 - \beta r_{\text{წ}} C_0 F - g_{\text{წ}} X \quad (7.4)$$

აქ მიღებულია, რომ წონასწორული კონცენტრაცია $C_0^* = 0$. ეს სამართლიანია შეუქცევადი რეაქციებისათვის ან მისგან დაშორებულებისათვის. სწორედ ასეთ რეაქციებს ეკუთვნის აიროვანი ნაკადის ჟანგბადით ლითონის დაჟანგვის რეაქცია.

ჟანგბადის ნაკადი j_0 დამოკიდებულია მხოლოდ ჟანგბადის კონცენტრაციაზე ნაკადის გულში და მასის გადაცემის პირობებზე აიროვან ფაზაში. თუ დასაჟანგი ელემენტის დიფუზია ლითონში

საკმარისია, რომ დააკმაყოფილოს დაუნგვის რეაქცია (ანუ $j = j_0$), მაშინ რეაქციის სინქარე განისაზღვრება მარტო უანგბადის მოწოდებით და მისი მუდმივი კონცენტრაციისას C_0 იქნება მუდმივი. მაგრამ რეაქციის მსვლელობისას დასაუანგი ელემენტის Me -ს კონცენტრაცია მცირდება და შესაბამისად მცირდება ამ ელემენტის დიფუზიის საშუალებაც. დაწყებული რომელიღაც C_{Me}^* მნიშვნელობიდან, რომელსაც კრიტიკული კონცენტრაცია ეწოდება, დასაუანგი ელემენტის ნაკადი ფაზათა შორის ზედაპირისკენ აღარ ყოფნის ამავე ზედაპირზე მოსული მთელი უანგბადის რეაქციაში მონაწილეობას. ამ დროიდან რეაქციის სინქარე იზღუდება დასაუანგი ელემენტის დიფუზიით და დამოკიდებულია მის კონცენტრაციაზე.

პროცესის კვაზისტაციონარული მდგომარეობისათვის (2) განტოლებიდან გამოვა

$$gC_0 - j_{Me} F - gC = 0$$

$$C = C_0 - j_{Me} F / g.$$

7.6.14.3. მასის გადატანა ჰეტეროგენული რეაქციებისას

დიფუზიურ რეჟიმში მიმდინარე ჰეტეროგენული რეაქციების სინქარე განისაზღვრება რეაგენტების გადატანის სინქარით. ამიტომაც დიფუზიური კინეტიკის ფორმულაში შედის კოეფიციენტი β – მასის გადატანის პირობების მახასიათებელი.

ეს კოეფიციენტი განისაზღვრება ტოლობიდან

$$j = \beta \Delta C \quad (3) \quad \text{ანუ} \quad \beta = j / \Delta C \quad (4)$$

სადაც j არის ნივთიერების ნაკადის სიმკვრივე; ΔC – გადასანაცვლებელი ნივთიერების კონცენტრაციათა სხვაობა რეაქციის ზედაპირზე და ფაზის სიღრმეში.

ამრიგად, კოეფიციენტი β წარმოადგენს ნაკადის სიმკვრივეს, შეფარდებულს კონცენტრაციის სხვაობის ერთეულთან, რომელიც მასის გადატანის მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს.

ამასთან მიიჩნევენ, რომ დიფუზიური გადატანის პირობები ზედაპირზე მიმავალი ქიმიური რეაქციებისგან დამოუკიდებელია და ერთნაირი მთელ ზედაპირზე, ე.ი. ზედაპირი ფიზიკო-ქიმიური თვალსაზრისით ერთგვაროვანია (მას ეწოდება ერთნაირად მისაწოდომი ზედაპირების მეთოდი). მაგრამ ხშირად ზედაპირი არ არის ერთგვაროვანი. ამიტომ, თუ (3) განტოლება გვაძლევს მთელი F ზედაპირისათვის ნაკადის სიმკვრივის საშუალო (და არა მის ლოკალურ) მნიშვნელობას, β სიდიდე, განსაზღვრული (4) განტო-

ლებით, წარმოადგენს მასის გადატანის კოეფიციენტის საშუალო ანუ ეფექტურ მნიშვნელობას.

7.6.15. ლითონის დახალასება პლაზმურ-რკალური დნობისას

როგორც ვიცით, პლაზმურ-რკალური გადადნობა და დნობა საშუალებას იძლევა მივიღოთ მაღალი სისუფთავის ლითონი. შესაბამისად მაღალი მექანიკური თვისებებით. ლითონის დახალასება მდგომარეობს არალითონური ჩანართების, ლითონში გახსნილი აირების და სხვა მანე მინარევების მოშორებაში. დახალასება ხორციელდება სხვადასხვა მეტალურგიული რეაქციის მეშვეობით: ლითონ-აირის ზედაპირზე ჩანართების გამოტანის გზით ინერტულ ატმოსფეროში დნობისას; წყალბადით განჟანგვის გზით არგონისა და წყალბადის ატმოსფეროში დნობისას; წიდასთან ქიმიური ურთიერთქმედების გზით დნობისას წიდას გამოყენების შემთხვევაში. შესაძლებელია რამდენიმე ფაქტორის ერთდროული მოქმედება, მაგალითად. ელექტროდის ზედაპირზე ჩანართის გამოტანა და მისი გადატანა აბაზანის წიდაში. საერთოდ, შესაძლებელია ლითონის დახალასება აქროლადი მინარევების აორთქლებით და აგრეთვე დაჟანგვითი დახალასება, როცა აირის ფაზაში ჟანგბადია.

7.6.16. დახალასება მინარევების მექანიკური მოშორებით ნეიტრალურ არეში დნობისას

პლაზმურ-რკალური გადადნობისას ლითონის დახალასების ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანა, როგორც სხვა გადასადნობი პროცესებისას, არალითონური ჩანართების მოცილებაა.

7.6.16.1. არალითონური ჩანართების მოცილების მექანიზმი გადადნობითი პროცესებისას

საწინააღმდეგო მოსაზრებები ამ საკითხზე შემდგენიარად შეიძლება ჩამოყალიბდეს:

1. ლითონის გადნობისას ჩანართები მთლიანად იხსნება. აბაზანის გახურებისას თავიდან წარმოქმნილი ჩანართების რაოდენობა და შედგენილობა განისაზღვრება გადადნობის პროცესში

მიმდინარე ჟანგვა-აღდგენის და სხვა რეაქციების სისრულით, ე.ი. აბაზანის შედგენილობით ჩანართების გამოყოფის დაწყებისას. ასეთი მოდელი, თუკი ის შეიძლება გამოდგეს ლითონის დახალასების ასახსნელად გარე აქტიურგარემოიანი პროცესებისათვის (წილები და სხვ.). ნამდვილად გამოუსადეგარია ნეიტრალურ აირებში გადადნობისას.

2. ჩანართების გამოყოფისას ძირითადია მათი მექანიკური გამოდგენა ლითონის ზედაპირზე. უმთავრესად ელექტროდის ბოლოზე გამოსვლის შედეგად, სადაც ჩამონადენი ლითონის თხელი ფენისა და ჩანართების ზომები ერთნაირია.

ამ აზრთაგან უპირატესობის მიცემა რომელიმესათვის ძნელია. უფრო სავარაუდოა, რომ ნეიტრალურ გარემოში პლაზმურ-რკალური გადადნობისას, შესაძლებელია როგორც ჩანართების ნაწილობრივი გახსნა, ასევე მათი გადასვლა ლითონის ზედაპირზე, ხოლო აქტიური აირის ან წიდის არსებობისას – გადასვლა აიროვან ფაზაში ანდა გახსნილი ჩანართების კომპონენტების წიდაში გადასვლა ქიმიური ურთიერთქმედების საშუალებით.

უფრო დაწვრილებით შეეწერდებით ლითონის ზედაპირზე ჩანართების გადასვლასა და მათ გახსნაზე. ელექტროდის ბოლოდან ჩამონადენ თხევად ლითონს ისეთივე სისქე აქვს, როგორც მსხვილ ჩანართებს. ამრიგად, ისინი ადვილად ხვდება ლითონის ზედაპირზე. სავსებით შესაძლებელია აგრეთვე მცირე ჩანართების გადასვლა ლითონის იმავე ზედაპირზე. თხევადი ლითონის ზედაპირზე მოხვედრილი ჩანართების უკანეე ჩამობრუნება სითხეში ნაკლებად მოსალოდნელია (ამის დასამტკიცებლად შეიძლება თერმოდინამიკური გამოთვლების ჩატარება). ამრიგად, ლითონის ზედაპირზე მოხვედრილი ჩანართები რჩება იქ წიდური ფაზის სახით და, მაშასადამე, მათი შემცველობა ლითონში მცირდება. ჩანართების მოცილების ასეთი გზა პლაზმურ-რკალური გადადნობისას გეხედება უმთავრესად ელექტროდის პერიოდში. აბაზანის პერიოდში მისი წველილი გაცილებით ნაკლებია.

არალითონური ჩანართების შემცველი ლითონის დნობისას ლითონის ზედაპირზე გადასვლის გარდა ხდება მათი ლითონში გახსნაც დისოციაციის გამო. მაგრამ მათი გახსნა ლითონში ნაწილობრივ მიდის, რადგან ელექტროდის ბოლოზე გამდნარი ლითონის ზედაპირზე ჩანართები მცირე დროის განმავლობაში იმყოფება.

7.6.17. ელექტროდისა და აბაზანის პერიოდების მნიშვნელობა ჩანართების მოშორების პროცესში

ჩანართების 'ხელაპირ'ზე გამოტანითა და ერთდროული გახსნით მოშორების სრულყოფის შედეგად ელექტროდის პერიოდში შეიძლება გვეფიქრა, რომ აბაზანაში ჩასულ ლითონში ჩანართების რაოდენობა მცირე იქნებოდა და მით უფრო ნაკლები, რაც უფრო მეტია თხევადი ლითონის დაყოვნების საშუალო დრო ელექტროდზე. თხევადი ლითონის დაყოვნების ხანგრძლივობა კი ელექტროდზე იზრდება ელექტროდის დნობის სიჩქარის შემცირებით, მაგრამ თუ აბაზანის პერიოდშიც შეიძლება მოხდეს ჩანართების გამოდევნის პროცესი, მაშინ სხმულის დადუღების სიჩქარის შემცირებამ (შესაბამისად აბაზანის არსებობის გასაშუალოებული დროის გაზრდამ) ასევე უნდა შეუწყოს ხელი ჩანართების სრულ გამოდევნას. ამასთან, სხმულის დადუღების სიჩქარესთან ერთად აბაზანის ფორმა ხდება ბრტყელი მოხაზულობის, რის შედეგადაც მცირდება ზრდადი დენდრიტებით იმ ჩანართების ჩათრევის საშიშროება, რომლებიც გამოიყოფიან ხსნარიდან ანდა რჩებიან გაუხსნელები.

7.6.18. ჩანართების გამოყოფა ხსნარიდან ლითონის კრისტალიზაციისას

ლითონის გაცივებისას ხსნარიდან კელაუ გამოიყოფა გახსნილი ჩანართები. მათი ფორმა და შედგენილობა განისაზღვრება ლითონის გაცივების პირობებით. კრისტალიზატორში ლითონის გადადნობისას გაცივების სიჩქარე გაცილებით. მეტია, ვიდრე ფოლადის ბოყეში ჩამოსხმისას. ამიტომ მოსალოდნელია, რომ გადადნობის შედეგად სხმულში ჩანართები უფრო მცირე ზომების იქნება, ვიდრე საწყის ლითონში (ელექტროდში). სინამდვილეში ეს ასეც არის. შესაძლებელია აგრეთვე ჩანართების შედგენილობის შეცვლა. სწორედ ამით აიხსნება ლითონის სისუფთავის მაღალი ხარისხი მისი შეფასებისას მეტალოგრაფიული მეთოდებით (ბალეებით) არალითონური ჩანართებით დაბინძურებაზე.

ელექტროწილური გადადნობა

7.7. ელექტროწილური გადადნობა

ელექტროწილური გადადნობის ტექნოლოგია შემუშავებული იქნა უკრაინის მეცნიერებათა აკადემიის პატონის სახელობის ელექტროშედულების ინსტიტუტში. იგი წარმოიქმნა ელექტროწილური შედულების გაუმჯობესების შედეგად (შემდგომში ასევე შეიმქნა პლასმურ-რკალური გადადნობა).

ელექტროწილური გადადნობის (შემოკლებით ეწვ) პროცესის თავისებურებას წარმოადგენს ელექტრული რკალის არარსებობა. ელექტრული წრედი სახარჯ ელექტროდსა და დადუღებულ სხმულს შორის, რომლებზედაც მიიყვანება პოტენციალთა სხვაობა, იკვრება გამდნარი წიდის ფენის გაფლით. როგორც ცნობილია, წიდა მყარ მდგომარეობაში არ ატარებს დენს, თხევადი კი ხდება დენგამტარი, ოღონდ დიდი ელექტროწინალობით. ელექტრული წრედის ამ უბანზე გამოიყოფა დიდი რაოდენობის სითბო. წიდა ხურდება 1700-2000 °C-მდე, რის შედეგადაც შემოდნება მასში ჩაშვებული სახარჯი ელექტროდის ბოლო. ელექტროდის ლითონი წვეთების სახით ჩაედინება კრისტალიზატორის აბაზანაში და რამდენიმე ხნის შემდეგ მყარდება ზემოდან ქვევით სითბოს გადაცემისა და ტემპერატურის მაღალი გრადიენტის პირობებში. ეს გრადიენტი იქმნება აბაზანის ზემოდან წიდით გახურებით და ქვეშისა და კრისტალიზატორის წყლით გაცივებით.

ეწვ პროცესის ნორმალური მსვლელობისას ელექტროდის ბოლოს შემოდნობილ ნაწილს სწორი კონუსის ფორმა აქვს, რომლის წვეროზეც მხოლოდ ერთი წვეთი წარმოიქმნება. ელექტროდის ლითონის წვეთზე მოქმედებს რამდენიმე ძალა: სიმძიმის ძალა და ელექტროდინამიკური ძალები, რომლებიც წყვეტენ მას ელექტროდიდან და ფაზათაშორისი დაჭიმულობის ძალები, რომლებიც ეწინააღმდეგება მოწყვეტას. წვეთის მოწყვეტა, ბუნებრივია, მოხდება მაშინ, როცა პირველი ძალები გადააჭარბებენ მეორეს.

მოწყვეტის შემდეგ წვეთი ვარდება ვერტიკალურად და პრაქტიკულად დამოუკიდებლად ელექტროდის ჩაძირვის, პროცესების ელექტროტექნიკური პარამეტრებისა და წიდის თვისებებისაგან. იგი ელექტროდებს შორის მანძილს გადის 0,1-0,3 წამში. ჩამოვარდნილი წვეთი კინეტიკური ენერგიეს ხარჯზე იძირება აბაზა-

ნაში მყოფი თხევადი ლითონის მოცულობაში და იწვევს მისი ზედაპირის ტალღისებურ რხევას.

ურთიერთქმედების ზედაპირის მოყვანილი მაგალითი, რომელიც წარმოადგენს ურთიერთქმედების გეომეტრიული ზედაპირის შეფარდებას ლითონის წიდასთან (შეხების დროსთან მოცემულ არეში მათი ტემპერატურის გათვალისწინებით), გვინიჟნებს, რომ უმეტესი რეაქციების ყველაზე შესაძლო ადგილია წიდის კონუსზე მყოფ თხევად ლითონთან შეხების ზედაპირი. ამავე დროს ის პროცესები (მაგ. განვოგირდება), რომლებიც მოითხოვენ მაღალ ტემპერატურას, მიმდინარეობს უმთავრესად აბაზანისა და წიდის გამყოფ ზედაპირზე, სადაც მიიღწევა ლითონის უდიდესი ტემპერატურა. ლითონის წვეთოვანი გადატანის პერიოდში ლითონის ურთიერთქმედებას წიდასთან, ურთიერთშეხების მცირე გეომეტრიული ზედაპირის გამო, არსებობის მცირე დროის და უმნიშვნელო (დაახლოებით 10^0 -ით მეტი ვიდრე ელექტროდზე ჩამოდნობილი ლითონისა) გადახურების გამო აქვს დაქვემდებარებული მნიშვნელობა.

ლითონის გამყარების პირობები ეწვ-ს დროს საერთოდ მსგავსია კრისტალიზატორში სხმულის მიღების პირობებისა. რომლებიც გეხედება დნობის სხვა პროცესებში (ერგ, ესგ, პრგ)*. მაგრამ თხევადი ლითონის აბაზანის თავზე გადახურებული წიდის არსებობა და კრისტალიზატორის კედლებზე მყარი წიდის თბოსაიზოლაციო ქერქის წარმოქმნა ხელს უწყობს სითბოს უფრო გამოხატულ ღერძულ გაცემას. ეწვ-ს ლითონის სხმული გამყარების ხასიათით სიმაღლეზე სამ უბნად იყოფა:

1. წიდის აბაზანის უბანი. ლითონის პირველი ულუფები უშუალოდ ეხება ქვედის ან ქვეშის შუა ნაწილს. კრისტალიზაციის ზედაპირი (ფრონტი) ამ დროისათვის პორიზირტალურია, რის შედეგადაც იქმნება ხელსაყრელი პირობები დენდრიტების ვერტიკალური ზრდისათვის. კრისტალიზატორის კედლებთან შეხებაში მყოფი, არასაკმარისად გახურებული და ამიტომ ბლანტი წიდა წარმოქმნის გამყარებული წიდის უხეშ ქერქს.

2. მდგრადი გადადნობის უბანი. თხევადი ლითონის მოცულობის გაზრდისას ლითონისა და წიდის დონე იწვევს მაღლა. ხოლო ლითონური აბაზანის სიღრმე იზრდება ცენტრში. რადგან კრისტალიზატორის კედლებთან პირველ რიგში შეხებაში მოდის თხევადი და უკვე კარგად გახურებული წიდა, იგი კრისტა-

* ერგ - ვაკუუმურ-რკალური გადადნობა;
ესგ - ელექტრონულ-სხივური გადადნობა;
პრგ - პლაზმურ-რკალური გადადნობა.

ლიზატორის კედლებზე იზრდება თხელი ქერქის სახით, რომელიც ხასიათდება დაბალი თბოგამტარობით და გამორიცხავს თხევადი ლითონისა და კრისტალიზატორის უშუალო ურთიერთობას. ამიტომ აბაზანიდან სითბოს ძირითადი ნაკადი მიმართულია ქვეშე და არ იცვლება გამოხატული ღერძული კრისტალიზაციის მიმდინარეობის პირობები.

სხმულის დადუღებასთან ერთად იზრდება მისი თბური წინაღობა, რის შედეგადაც ჩნდება აბაზანის ცილინდრული ნაწილი და იზრდება სითბოს ის წილი, რომელიც კრისტალიზატორის კედლებს გადაეცემა. ძალიან ღრმა აბაზანის შემთხვევაში სითბოს რადიალური გადაცემის წვლილი იზრდება და ეწვ-ს სხმულის ზედა ნაწილში შეიძლება გამოჩნდეს რადიალური კრისტალიზაციის ისეთივე ნაკლოვანებები, როგორც გეხვედება ვაკუუმურ-რკალური გადადნობის სხმულებში.

3. ჩაჯდომის ღრმულის მოშორების უბანი. დნობის სინქარის თანდათანობითი შემცირებით და წიდის გახურებით ელექტროდის დნობის შეწყვეტის შემდეგ, შესაძლებელია მთლიანად მოვსპოთ ჩაჯდომის ნაკლოვანებების წარმოქმნა და მივიღოთ სხმულის ზედა ნაწილის პრაქტიკულად პორიზონტალური ზედაპირი.

ამრიგად, ეწვ-ით მიღებული ლითონის ხარისხის გაუმჯობესება მიიღწევა გადახურებული აქტიური წილით მისი დახალასებისა და თანმიმდევრული ღერძული კრისტალიზაციის შედეგად. ლითონის დახალასების ხარისხი და დადუღებული სხმულის სტრუქტურა განისაზღვრება წიდის და ლითონის ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით და აგრეთვე, თხევადი აბაზანის თბური მდგომარეობით, რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება პროცესის ელექტროტექნიკური პარამეტრებით, ელექტროდისა და კრისტალიზატორის გეომეტრიით და მთელი რიგი სხვა ფაქტორებით.

მეტალურგიულ პროცესებზე და გადადნობის ელექტროტექნიკურ პარამეტრებზე დიდ გავლენას ახდენს წიდების შედგენილობა და თვისებები. ამჟამად ფართოდ იყენებენ განმაგორდებელ ფტორიან წიდებს CaF_2 -ის ფუძეზე, რომელსაც ემატება მდგრადი ქანგეულები. აგრეთვე გამოიყენება $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ სისტემის წიდები. გადადნობის პროცესში ნახშირბადის, ფოსფორისა და სხვა მინარეების კარგი დაქანგვისათვის გამოიყენება წიდები FeO -ს და MnO -ს მაღალი შემცველობით.

ეწვ-ს წიდები არა მარტო ახალასებენ ლითონს, არამედ წარმოადგენენ სითბოს წყაროსაც, აყალიბებენ სხმულის ზედაპირს, იცავენ ლითონს აირებისაგან, მონაწილეობენ ელექტრული რკალის შეკერაში და ასრულებენ სხვა მრავალ ფუნქციას. ამიტომ

წიდას წაყენება მკაცრი მოხთონები ქიმიური შედგენილობის, ფიზიკური და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების მხრივ. ძირითადად ეს მოთხოვნები შემდეგია:

1. წიდის შედგენილობამ უნდა უზრუნველყოთ გარკვეული ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების მსვლელობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყოთ ლითონის დახალასება მასში გახსნილი არასასურველ ნაერთებისა და არალითონური ჩანარებისაგან; აქტიური მალეგირებელი ელემენტების (Al, Ti და სხვა) დაცვა დაჟანგვისაგან; ქიმიური შედგენილობის ერთგვაროვნება სხმულის მთელ სიმაღლეზე.

2. სამუშაო ტემპერატურებზე (1500-1900 °C) წიდის ელექტროგამტარობა უნდა იყოს 1-6 სიმ/სმ². წიდის კარგმა ელექტროგამტარობამ შეიძლება ვერ უზრუნველყოთ სითბოს საჭირო რაოდენობის გამოყოფა. ხოლო ცუდმა შეიძლება წარმოქმნას რკალური განმუხტვა.

3. წიდა უნდა იყოს ადვილდნობადი, პქონდეს დუღილის მაღალი ტემპერატურა და ტემპერატურის დიდ ზღვრებში მისი სიბლანტე მცირედ უნდა იცვლებოდეს. ასეთი წიდა იძლევა გარნისაჟის თხელ სუფთა ქერქს და შესაძლებელს ხდის კარგი ზედაპირის მქონე სხმულის მიღებას.

4. წიდას ლითონთან გამყოფ ზედაპირზე უნდა პქონდეს მაღალი ფაზათაშორისი დაჭიმულობა და გააჩნდეს დიდი ადგენია არალითონური ჩანარებისადმი. ეს ხელს უწყობს წიდის ლითონისგან კარგ მოშორებას, გამორიცხავს მის გაბმას ლითონის აბაზანაში და უზრუნველყოფს წიდის ქერქის ადვილ მოშორებას სხმულის ზედაპირიდან. აგრეთვე ხელს უწყობს წიდის მიერ არალითონური ჩანარების გამოყოფას ლითონიდან.

გარდა ამისა, წიდა არ უნდა შეიცავდეს იშვიათ და ძნელად საშოვნელ შენაერთებს, ადვილად უნდა იფხენებოდეს. არ უნდა იყოს ძალზე პიგროსკოპული ან ძალიან ძვირი.

უფრო ხშირად ეწვ გამოიყენება ლითონის კარგი განგორდებისათვის, არალითონური ჩანარებისაგან დასახალასებლად და ერთგვაროვანი, მეკრივი სტრუქტურის მისაღებად. ამიტომ ყველაზე ხშირად გამოიყენებენ განმაგორდებელ წიდას.

მაღალი განგორდების უნარი აქვს CaO-ს, მაგრამ Ca²⁺ კათიონი O²⁻ ანიონთან წარმოქმნის მტკიცე ნაერთს, რაც განაპირობებს წიდის დნობის მაღალ ტემპერატურას და სიბლანტის საგრძნობ ცვლილებას ტემპერატურის შეცვლისას. ამიტომ ხშირად

* სიმ – სიმენსი (ელექტროგამტარობის ერთეულია).

გამოიყენებენ უფრო დეფიციტურ მლღობ 'მპატს CaF_2 , რომელსაც განგოვირდების უნარის გასახრდელად უმატებენ CaO -ს. მარამ CaF_2 და CaO ხასიათდება კარგი ელექტროგამტარობით. ელექტრული წინაღობის გაზრდის მიზნით მას უმატებენ თიხამიწას (Al_2O_3), რაც იწვევს ხსნარში მსხვილი ანიონების ($\text{Al}_3\text{O}_7^{3-}$, AlO_3^{3-} , Al_2O^{4-}) წარმოქმნას და ელექტროგამტარობის შემცირებას. 25–30 %-ით. Al_2O_3 და 60–70 % CaF_2 შემცველობის წიდა დნება ~1300 °C-ზე. ეწგ-ს დროს კი იმყოფება გადახურებულ მდგომარეობაში, რის გამოც ხდება ძალიან აქტიური.

ეწგ-ის წილებში არასასურველი მინარეებია ადვილად აღსადგენი ჟანგეულები (რკინის, მანგანუმის, ქრომის, კაუბადის და სხვა), რადგან იმ ლითონების გადადნობისას, რომლებიც შეიცავენ მაღალაქტიურ მალეგირებელ ელემენტებს, ჟანგეულები აღდგება ამ ელემენტებით, რის შედეგადაც Ti-ის და Al-ის შემცველობა სხმულის სიმაღლეზე იცვლება.

7.7.1. ელექტროწიღური გადადნობის ტექნოლოგია

ეწგ-ს ელექტროდეს არ წაყენება ისეთი მკაცრი მოთხოვნები, როგორც ვრგ-ს ელექტროდებს. ეს იმით აიხსნება, რომ ეწგ-ს შემთხვევაში უფრო მყარი თბური რეჟიმია და თუ წიდაში მოხედა ხენჯი, შეიძლება მისი აღდგენა დნობის მსველელობისას. მიუხედავად ამისა, ეწგ-ს დანადგარების ელექტროდების სიმრუდე არ უნდა აღემატებოდეს 5 მმ-ს 1000 მმ-ის სიგრძეზე. გარდა ამისა, არ დაიშვება ელექტროდების ზედაპირზე ღრმად ჩახეული ადგილები, განივი ბზარები, ფურჩები (მინაშხეფები) და სხვა, რომელთაც შეუძლიათ გამოიწვიონ ელექტროდიდან ანატეხების ჩავარდნა წიდის აბაზანაში. ელექტროდების ზედაპირი, როგორც წესი, იწამლება ან იწმინდება.

ელექტროდები გადააქეთ ვერტიკალურ მდგომარეობაში და ისე ათავსებენ ელექტროდის დამჭერში.

კრისტალიზატორს და ქვეშს წმენდენ წიდის ნარჩენებისაგან. რკინის ნამცეცებისაგან და ნაფრქვევისაგან. ქვეშზე დებენ ამნთებ საყელურს. თუ გამაცეცებელი წყლის ტემპერატურა ნაკლებია საამქროს ტემპერატურაზე, მაშინ ქვეში და კრისტალიზატორი ინამება და ისინი კარგად უნდა გამშრალდეს.

პროცესის დაწყების ორი ვარიანტი არსებობს: თხეეადი ან მყარი დაწყება. თხეეადის დროს წიდას ადნობენ უშუალოდ კრისტალიზატორში. ამისათვის ამნთებ საყელურზე დებენ მცირეოდენ

რკინის ბურბუშელას და აყრიან გარკვეული რაოდენობის თერმულ ნარევეს (აღუშინისა და მაგნიუმის ფხენილთა ნარევი კალიუმის გვარჯილასთან).

ნარევის წვის დამამუხრუჭებელი შემესების მაგიერად იყენებენ მუშა წიდას. ელექტროდს სწევენ დაბლა რკინის ბურბუშელის შესებად და ელექტროდსა და კრისტალიზატორს შორის ღრწოში ყრიან წიდას – დნობის წონის 3–4 %-ს. ძაბვის მიწოდებით წრედი იკერება ბურბუშელაზე გავლით. მასში გაივლის დიდი ძალის დენი. ბურბუშელა დნება და თერმული ნარევი ინთება. ეგზოთერმული რეაქციის სითბოთი და ქვეშსა და ელექტროდს შორის წარმოქმნილი რკალით დნება სამუშაო წიდა. როცა გამდნარი წიდა შეკრავს წრედს ელექტროდსა და ქვეშს შორის, პროცესი რკალურიდან გადადის ელექტროწილურში.

უფრო თანამედროვედ ითვლება დნობის თხევადი დაწყება. ელექტროდს თავიდანვე უშვებენ ქვეშამდე ისე, რომ მათ შორის გარკვეული მანძილი რჩება. ქვეშსა და ელექტროდზე მიიყვანენ ძაბვას და კრისტალიზატორში ასხამენ ცალკე გამდნარ მუშა წიდას. წიდა ავსებს ქვეშსა და ელექტროდს შორის მანძილს და წრედი იკერება.

დნობის რეჟიმის სწორი შერჩევისას ელექტროდის ბოლოს აქვს სწორი კონუსის ფორმა ელექტროდის დიამეტრის ფუძით (ან სწორი პრიზმის ფორმა ოთხკუთხა ელექტროდების გამოყენებისას). თუ ელექტროდის მიწოდების სიჩქარე სჭარბობს დნობის სიჩქარეს, მაშინ მისი ბოლო იღებს მომრგვალებულ ფორმას და ელექტროდი ეშვება წიდაში შემოუდნობი ცილინდრული ნაწილით. თუ ელექტროდის მიწოდების სიჩქარე ნაკლებია დნობისაზე, მაშინ კონუსის ფუძე უფრო მცირე ხდება. ვიდრე ელექტროდის კვეთი, ხოლო ელექტროდის პორიზონტალურ სარტყელს და წიდას შორის იკერება რკალი.

გადადნობისას შესაძლებელია დენის ძალის ნახტომები. ის დასაშვებია დენის ძალის საშუალო მნიშვნელობის 25 %-მდე. შესაძლებელია აგრეთვე მცირე ხნით (30 წამით) დენის ძალის გადახრები ნორმალურიდან ნულამდე. წიდის აბაზანის თბური ინერციის გამო ეს მოვლენა ისეთი საშიში არ არის, როგორც გადადნობის სხვა ხერხების შემთხვევაში.

დნობის ბოლოს მცირდება ელექტროდის სიგრძე და შესაბამისად – მისი ელექტროწინალობა. ეს უნდა იყოს გათვალისწინებული დნობის რეჟიმში.

გადნობის შემდეგ სხმულს აყოვნებენ კრისტალიზატორში ლითონის და წიდის სრულ გამყარებამდე. სხმულის ზომების მიხედვით, ამ დაყოვნებამ შეიძლება რამოდენიმე საათს გასტანოს.

7.7.2. ლითონის ხარისხი და ეწვ-ს გამოყენების არე

ელექტროწიდური გადადნობა უზრუნველყოფს ღერძული ან ღერძულ-რადიალური მკერძი სხმულის მიღებას ჩაჯდომის ნიჟარისა და ლიკვაციური ნაკლოვანებების გარეშე. გადადნობის შემდეგ ჟანგბადის ჩანართების რაოდენობა 2-3-ჯერ მცირდება. ჩანართები ხდება უფრო მცირე ზომის და თანაბრად ნაწილდება სხმულში. გადადნობა იძლევა საშუალებას მივიღოთ გოგირდისა და ჩანართებისაგან პრაქტიკულად სუფთა სხმული. საგრძნობი რაოდენობით მცირდება ადვილდნობადი ფერადი ლითონები (Pb, Zn და სხვ.). ლითონის სისუფთავის გაზრდის წყალობით იზრდება მისი ტექნოლოგიური და საექსპლუატაციო თვისებები, განსაკუთრებით პლასტიკურობა, მექანიკური თვისებები განიე კვეთში, ხანგრძლივი სიმტკიცე მაღალ ტემპერატურებზე, პოლირება, შედუღება და სხვ. ტექნოლოგიური პლასტიკურობის გაზრდა საშუალებას იძლევა დამატებითი ლეგირებით გაესარდოთ ლითონის მხურვალმედვეობა და მხურვალმტკიცეობა.

ელექტროწიდური გადადნობა, ისევე როგორც ვაკუუმურ-რკალური, ხელს უწყობს თითქმის ყველა ფოლადისა და შენადნობის თვისებების გაუმჯობესებას.

ეწვ-ს ლითონი უფრო სუფთაა ვრგ-ს ფოლადთან შედარებით გოგირდოვანი, სილიკატური და წერტილოვანი ჩანართებისაგან; ჩამორჩება აირებით გატუჭყიანებაში, ფერადი ლითონების ჩანართების რაოდენობაში, ჟანგულ და გლობულარულ ჩანართებში.

ეწვ-ს ეჭვგარეშე უპირატესობა ვრგ-სთან შედარებით არის მისი კონსტრუქციის სიმარტივე, ცვლად დენზე მუშაობა, სხმულის ზედაპირის მაღალი ხარისხი, კვადრატული, ოთხკუთხა ან სხვა კონფიგურაციის სხმულების მიღების შესაძლებლობა. თანაც 1 ტ. ეწვ-ს ლითონის ღირებულება 1,5-ჯერ ნაკლებია ვრგ-ს ლითონისაზე.

VIII ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავება

8.1. ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების აუცილებლობა

უკანასკნელ დრომდე ფოლადის წარმოება მთელ მსოფლიოში ექსტენსიური გზით ვითარდებოდა. მე-20 საუკუნის დასასრული-სათვის მსოფლიოს ქვეყნებში წარმოებული ფოლადის ჯამურმა რაოდენობამ 700 მილიონ ტონას გადააჭარბა. მიუხედავად ამისა, მანქანათმშენებლობა მაინც განიცდიდა ფოლადის ნაკლებობას. ცხადი გახდა, რომ მარტო რაოდენობის ზრდით პრობლემა ვერ გადაწყდებოდა. მხოლოდ ხარისხის ამაღლებაში, კოროზიული მედეგობის, მექანიკური თვისებების და საიმედოობის გაზრდაში შეიძლებოდა გამოსაყლის პოვნა.

თანამედროვე ფოლადსაღნობი აგრეგატები ისეთი მაღალი ენერგეტიკული დატვირთვით მუშაობს, იმდენად მაღალია მათი წარმადობა, რომ ღუმელშივე ფოლადის რაფინირება და ხარისხობრივად სათანადო კონდიციამდე დაყვანა ტექნოლოგიურად შეუძლებელი და ეკონომიკურად გაუმართლებელი ხდება. ამიტომ ფოლადის საჭირო ქიმიურ შედგენილობამდე დაყვანა და მისი გასუფთავება ანუ რაფინირება ხდება ღუმელის გარეთ, გამდნარი ფოლადის მიმღებ ციცხეში.

ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების თანამედროვე მეთოდები მათი ფუნქციონალური დანიშნულებისდა მიხედვით შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგ ტექნოლოგიურ სახეებად:

1. ფოლადის გაქრევა ციცხეში ინერტული აირებით (არგონი, აზოტი), რომელიც უზრუნველყოფს ლითონის ქიმიური შედგენილობისა და ტემპერატურის ერთგვაროვნებას ციცხვის მთელ მოცულობაში;

2. ფოლადის დამუშავება გამდნარი სინთეზური წიღებით ან მყარი წიდაწარმოქმნელი ნარევებით ციცხეში, იმავედროულად ლითონში ფხვნილოვანი რეაგენტების შებურვით ინერტული აირის ჭაელის მეშვეობით, რაც უზრუნველყოფს ლითონის როგორც ქიმიური შედგენილობის ერთგვაროვნებას, ასევე გოგირდის შემცველობის შემცირებას 0,001–0,003 %-მდე.

3. ფოლადის დამუშავება ვაკუუმში, რომელიც უზრუნველყოფს ლითონში მანე მინარეგების – წყალბადის, აზოტის და არალი-
თონური ჩანართების შემცირებას;

4. არგონ-ჟანგბადის (აირების) ნარევიტ ფოლადის გაქრევა
ციცხეში, რომელიც უზრუნველყოფს დაბალნახშირბადიანი,
კოროზიამდეგი, ხარისხიანი ფოლადის მიღებას.

5. ფოლადის გახურება ციცხეში ელექტრორკალის მეშვეობით
(ციცხე-ღუმელი), რომელიც უზრუნველყოფს ლითონის სათანადო
მაღალ ტემპერატურას ლეგირებისა და რაფინირების პროცესის
მიმდინარების დროს.

ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების აღნიშნული მეთოდები
შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც ვალ-ვალკე, ასევე სხვა-
დასხვა კომბინაციაში, იმისდა მიხედვით, თუ რა მითხოვნებია
წაყენებული ფოლადის საბოლოო პროდუქტის მიმართ.

8.2. ფოლადსადნობი აგრეგატიდან ფოლადის გამოშვების დროს მიმდინარე ჰიდროდინამიკური, ქიმიური და სითბური პროცესები

დნობის დამთავრების შემდეგ ფოლადსადნობი აგრეგატიდან
გამოსული ლითონი გამოსაშვები ხერელისა და ღია ღარის გაე-
ლით ჩაედინება ციცხეში. ლითონის მოძრაობის აღწერა უნივერ-
სალური კანონით, რომელიც გამოსადეგი იქნება ყველა შემთხვე-
ვისათვის, შეუძლებელია. ეს, უპირველეს ყოვლისა, აიხსნება
ფოლადსადნობი აგრეგატების კონსტრუქციული თავისებურებებით
და მათ შორის არსებული განსხვავებებით. ბესემერისა და თომასის
კონვერტერებიდან ნადნობის გამოშვება ხდება ამ აგრეგატების
ყელიდან მათი დახრის შემდეგ. ჟანგბად-კონვერტერულ პროცესში
ნადნობი გამოედინება კონვერტერის ყელში დატანებული
ხერელიდან ან ყელიდან. ქველური ტიპის ფოლადსადნობი აგრე-
გატებიდან (მარტენის, ელექტროფოლადსადნობი, ორბაზანიანი
ღუმელი) თხეკადი ფოლადისა და წიდის გამოშვება ხდება ღუმელ-
ში დატანებული ხერელიდან, რომელიც შემდეგ უერთდება ღია
ღარს, აქედან კი ნადნობი ჩაედინება ციცხეში.

ცნობილია სითხის დინების ორი სახე: ლამინარული და
ტურბულენტიური.

ლამინარული და ტურბულენტიური მოძრაობის დასადგენად
გამოიყენება რეინოლდსის კრიტერიუმი

$$Re = \frac{Vd\rho}{\mu}, \quad (8.1)$$

სადაც V არის ნაკადის საშუალო სიჩქარე, მ/წმ;

d – ჰიდრავლიკური დიამეტრი, მ;

ρ – სითხის სიმკვრივე, კგ/მ³;

μ – სითხით დინამიკური სიბლანტე, ნ.წმ/მ²

ამ შემთხვევაში რეინოლდსის კრიტერიუმი წარმოადგენს მოძრავ სითხეში სიბლანტისა და ინერციის ძალების თანაფარდობის საზომს.

მიღში სითხის მოძრაობისას რეინოლდსის კრიტერიუმი შეიძლება გამოესახოს მოცულობითი ან წონითი ხარჯის მიხედვით

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} = \frac{4G}{\pi d\nu g}, \quad (8.2)$$

სადაც Q არის სითხის მოცულობითი ხარჯი, მ³/წმ;

d – მილის დიამეტრი, მ;

ν – კინემატიკური სიბლანტე, მ²/წმ;

μ – დინამიკური სიბლანტე, ნ.წმ/მ²;

G – წონითი ხარჯი, ნ/წმ;

g – სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ²;

რეინოლდსის კრიტერიუმის კრიტიკული სიდიდეა 2320. როდესაც $2320 < Re < 10000$, ადგილი აქვს გარდამავალი ხასიათის მოძრაობას. განვითარებული ტურბულენტური მოძრაობის დროს $Re > 10000$.

გამოშვების დასაწყისში ფოლადის გამოდინების სიჩქარე დაბალია და მისი მოძრაობა შეიძლება მიეკუთვნოს ლამინარულს. შემდეგ სიჩქარე თანდათან იზრდება, მოძრაობის ხასიათი იცვლება და ლამინარული დინება ტურბულენტურში გადადის. ნაკადის ტურბულენტური ხასიათის მიუხედავად, მისი გარკვეული ნაწილი ისევ ლამინარულად მოედინება. ეს ეხება ღუმელის გამოსაშვები ხვრელისა და ღარის კედლების მიმდებარე ფენებს. ე.წ. სასაზღვრო ფენას. ამ ფენაში სითხის შინაგანი ხახუნის ძალები (სიბლანტე) ამცირებს მისი მოძრაობის სიჩქარეს. სასაზღვრო ფენის სისქე მართალია, დიდი არ არის, მაგრამ მისი უგულვებელყოფა დაუშვებელია. საერთოდ, რაც უფრო მეტია ტურბულენტურობის ხარისხი (რეინოლდსის რიცხვი), მით უფრო მცირეა სასაზღვრო ფენის სისქე. მათემატიკურად ამ დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს:

$$\delta = \frac{d}{\sqrt{Re}},$$

სადაც δ არის სასაზღვრო ფენის სისქემ, m ;

d – მილის დიამეტრი, m ;

Re – რეინოლდსის რიცხვი.

გამოშვების ბოლოს ლითონის გამოდინების სინქარე მცირდება და ნაკადი ლამინარული ხდება.

ღუმელიდან გამოშვების პერიოდში ფოლადის მოძრაობის ბუნება გარკვეულწილად განსაზღვრავს მთელი რიგი პროცესების განვითარების ხასიათს. ღუმელში, გამოშვების წინ, ფოლადის ტემპერატურა შეადგენს 1600–1640 °C, ხოლო წიდის ტემპერატურა 1700 °C აღწევს. გამოსაშვებ ხერულში და ღარში მოძრაობისას და შემდეგ ღარიდან ციციხეში ლითონის ნაკადის თავისუფალი ვარდნისას ფოლადი ღუმელის ატმოსფეროსაგან განსხვავებულ გარემოში ექცევა. ახალი გარემოს ტემპერატურა ბევრად ნაკლებია ფოლადის ტემპერატურასთან შედარებით. ამავ დროს საგრძნობლად დიდია ატმოსფეროს ჟანგბადის კოტენციალი. ამის შედეგად ვითარდება სითბოსა და ჟანგბადის მიმოცვლის პროცესი ლითონსა და გარემოს შორის – სითბო გადადის ფოლადიდან ღარზე, ციციხის ამონაგზე, ატმოსფეროში, ხოლო ატმოსფეროდან შემოდის ჟანგბადი, რომელიც იწვევს ლითონის მეორად დაჟანგვას. ლამინარული მოძრაობისას სითბოს კარგვა ნაკლებია, ტურბულენტურისას კი – დიდი. ლამინარული მოძრაობისას ლითონს ნაკლები კინეტიკური ენერგია გააჩნია, ტურბულენტურისას კი – მეტი. ტურბულენტური დინებისას ლითონის ნაკადი ნაწვევდება, იზრდება ლითონის ატმოსფეროსთან შეხების ზედაპირი, რაც, თავის მხრივ, ზრდის ფოლადის მეორადი დაჟანგვის ხარისხს. ამრიგად, ფოლადის ნაკადის ხასიათი განსაზღვრავს ღუმელიდან ლითონის გამოშვების პერიოდში როგორც სითბური, ასევე ქიმიური პროცესების მიმდინარეობას.

მრავალრიცხოვანი ცდებით დადგენილია, რომ ღუმელში წინასწარ განჟანგული ფოლადის გამოშვების დროს ხდება მისი ინტენსიური მეორადი დაჟანგვა, რის შედეგადაც ჟანგბადის შემცველობამ ფოლადში შეიძლება გადააჭარბოს იმას, რაც გვექონდა ღუმელში განჟანგვის წინ. ეს კი იწვევს ფოლადში გახსნილი აქტიური ელემენტების (Mn, Si, Cr და სხვა) ამოწვას და მათ დიდ დანაკარგს, რაც ეკონომიკურად სრულიად გაუპართლებელია. ამიტომ არის, რომ მთელ რიგ შემთხვევებში ღუმელში წინასწარ განჟანგვას აღარ ატარებენ, განსაკუთრებით კი დაბალნახშირბადიანი ფოლადების გამოდნობის დროს. გაუჟანგავი ფოლადის გამოშვების დროს, პირიქით, ჟანგბადის რაოდენობა რამდენადმე კლებულობს, რაც აიხსნება ნახშირბადის ამოწვით ღარზე. ლითონ-

ნის გარემომცველ ატმოსფეროში ნახშირორჟანგისა და ნახშირ-
ჟანგის პარციალური წნევა ბევრად ნაკლებია, ვიდრე ლუმელის
ატმოსფეროში. ამის გამო შესამჩნევად ადვილდება ნახშირბადის
დაჟანგვა ლითონში გახსნილი ჟანგბადით. გამოყოფილი ნახშირ-
ჟანგი ლითონის ჭავლეზე წარმოქმნის დამცავ ფენას და ხელს
უშლის ჰაერთან მის კონტაქტს. თუ ლუმელიდან გამოშვებული
ლითონის ჭავლის სტრუქტურა კომპაქტურია და ჰაერთან მისი
კონტაქტის ხანგრძლივობა მცირეა, ჟანგბადი ვერ ასწრებს ფო-
ლადში დიდი რაოდენობით გახსნას. პირიქით, გაშლილი, შხეფე-
ბიანი ჭავლის და გამოშვების დიდი ხანგრძლივობის შემთხვე-
ვაში იზრდება ლითონთან ჟანგბადის ურთიერთქმედება და მეო-
რადი დაჟანგვის ხარისხი.

გამოშვების დამთავრების შემდეგ ფოლადი გარკვეული ხნის
განმავლობაში იმყოფება ციციხეში. ციციხეში დაყოვნების დროს
გრძელდება ქიმიური პროცესები. კერძოდ, ადგილი აქვს განმჟანგე-
ლების ურთიერთქმედებას ფოლადში გახსნილ ჭარბ ჟანგბადთან
და ოქსიდური ჩანარების წარმოქმნას. გარდა ამისა, განმჟანგე-
ლი ელემენტები ურთიერთქმედებენ ციციხვის ამონაგთან. ლუმელი-
დან გადმონადენ წიდასთან და ადგილი აქვს დამატებითი ჟანგე-
აღდგენითი პროცესების განვითარებას. ხშირ შემთხვევაში ეს
იწვევს წიდას ფუძიანობის შემცირებას, რაც ხელს უწყობს რეფოს-
ფორაციას, ანუ წიდიდან ლითონში ფოსფორის გადასვლას.

სადნობი აგრეგატის მაღალტემპერატურული გარემოდან
გამოსული 1600-1640 °C ტემპერატურის მქონე ლითონი ექცევა
დაბალტემპერატურულ გარემოში – ლუმელის გამოსაშვებ ხერელ-
ში, ღარზე და ციციხეში. ტემპერატურა გამოსაშვებ ხერელში
ლითონის გამოშვების მომენტში არ აღემატება 300-400 °C, ღარზე
და ჰაერის გარემოში – 30-60 °C. რაც შეეხება საჩამოსხმო
ციციხეს, მას წინასწარ ახურებენ ან სითბო წინა დნობიდან აქვს
შენარჩუნებული და ამიტომ მისი ტემპერატურა შეიძლება აღ-
წევდეს 500-600 °C.

ტემპერატურათა შორის არსებული განსხვავება იწვევს სით-
ბური პროცესების განვითარებას, კერძოდ, სითბოს გადაცემას
ფოლადიდან გარემოზე. ფოლადსა და გარემოს შორის სითბოს
მიმოცვლა წარმოადგენს რთულ პროცესს, რომელიც მიმდინა-
რეობს თბოგამტარობის, კონვექციის და გამოსხივების ერთდრო-
ული განვითარების პირობებში. ფოლადის გამოშვების პროცესში
ციციხეში ჩამდინარე ლითონის ჭავლს დიდი კინეტიკური ენერჯია
გააჩნია. ეს იწვევს ციციხვის შევსების პროცესში ტურბულენტური
ნაკადების წარმოქმნას და ლითონი იძულებითი კონვექციით

გადასცემს სითბოს ციციხვის ამონაგს. ფოლადის გამოშვების დამთავრების შემდეგ მას გარკვეული ხნით აყოვნებენ ციციხეში. ამ დროს კვლავ გრძელდება ლითონის მოძრაობა და ამჯერად ლითონიდან ციციხვის ამონაგზე სითბოს გადაცემა ხდება თავისუფალი კონვექციით. ციციხეში ფოლადის დაყოვნების პერიოდში ცირკულაციური ნაკადების წარმოქმნას ხელს უწყობს ციციხვის სიმაღლეზე ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის უთანაბრობით გამოწვეული ლითონის მასების სიმკვრივეთა შორის არსებული განსხვავება.

თავისუფალი კონვექციით მიღებულ სითბოს ციციხვის ამონაგი თბოგამტარობით გადასცემს ციციხვის გარე კედლებს, ხოლო შემდეგ კი გარემომცველ გარემოს. ამ პროცესებს ადგილი აქვს აგრეთვე ღარზე ლითონის მოძრაობისას და ციციხეში ჩადინებისას.

გამოშვების პროცესში ლითონის ტემპერატურის შემცირების გამოთვლა შეიძლება შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta T_1 = \frac{\tau_1}{60H\rho c} \left[q \left(\frac{H}{R} + 1 \right) + C_0 \varepsilon \left(\frac{T_i}{100} \right)^4 \right], \quad (8.3)$$

სადაც ΔT_1 არის გამოშვების პროცესში ლითონის ტემპერატურის შემცირება, °C.

τ_1 - გამოშვების ხანგძლივობა, წთ;

H - ლითონით ციციხვის შევსების სიმაღლე, მ;

R - ციციხვის შიგა რადიუსი, მ;

ρ - თხევადი ლითონის სიმკვრივე, კგ/მ³;

C - თხევადი ლითონის კუთრი თბოტევადობა, ჯ/კგ·K;

C_0 - აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების კოეფიციენტი;

ε - ლითონის ზედაპირული ფენის სიშავის ხარისხი (თხევადი ფოლადის ჭავლისათვის 0,50–0,55);

T_i - ლითონის ტემპერატურა გამოშვების წინ, K;

q - თხევადი ლითონისა და ციციხვის ამონაგის საზღვარზე კუთრი სითბური ნაკადი, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$q = \frac{2240}{\sqrt{\tau_1}} \left[20 \cdot (T_1 - 1873)^{0.75} + 150 \right]. \quad (8.4)$$

ფოლადის გაცივება გრძელდება ციციხეში მისი დაყოვნების დროსაც. ციციხეში დაყოვნების დროს ფოლადის ტემპერატურის შემცირების გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:

$$\Delta T_2 = \frac{2q}{H\rho c} \left(\frac{H}{\rho} + 1 \right) \tau_2, \quad (8.5)$$

სადაც ΔT_2 არის ტემპერატურის შემცირება, K;

τ_2 – დაყოვნების ხანგრძლივობა, სთ.

სითბური დანაკარგების სიდიდე დამოკიდებულია აგრეთვე ციცხვის ამონაგის სისქეზე. დადგენილია, რომ 110-150 ტ ტუვადობის ციცხეებში ეს დანაკარგი შეადგენს 45-60 °C, ხოლო 250 ტ ციცხვი-სათვის – 25-40 °C.

გარდა აღნიშნულისა, ლითონის ტემპერატურა ციცხეში იცვლება განმუხანგველი და მალეგირებელი შენადნობების მიწოდების და მათი ფოლადში გახსნის შედეგად. ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს ორ ურთიერთგამომრიცხავ პროცესს. უპირველეს ყოვლისა, დაბალი ტემპერატურის მქონე მალეგირებელი თუ განმუხანგველი შენადნობი ფოლადში გახსნისას შთანთქავს სითბოს გარკვეულ რაოდენობას (Q_1), მეორე მხრივ კი, ფოლადში გახსნილი განმუხანგველი და მალეგირებელი ელემენტი ურთიერქმედებს ლითონში გახსნილ ჟანგბადთან, ასევე ატმოსფეროს ჟანგბადთან და წიდაში არსებულ ჟანგეულებთან, რის შედეგადაც გამოიყოფა სითბოს გარკვეული რაოდენობა (Q_2). ამ ორი სიდიდის ჯამი ($\Delta Q = Q_1 + Q_2$) გვიჩვენებს, თუ რა რაოდენობის სითბო იკარგება განუხანგვისა და ლეგირების პროცესის მიმდინარეობის დროს.

8.3. ფოლადის გაქრევა ციცხეში ინერტული აირებით

ზემოთ უკვე იყო აღნიშნული, რომ ყოვლადსადნობი აგრეგატ-ტიდან გამოშვებული და ციცხეში მოთავსებული თხევადი ლითონი ხასიათდება როგორც ტემპერატურული, ასევე ქიმიური შემადგენლობის არაერთგვაროვნებით. მართალია, ციცხეში ჩამდინარე ლითონის ნაკადს საკმაოდ დიდი კინეტიკური ენერჯია გააჩნია და ხდება ამ ნაკადით ლითონის არევა. მაგრამ ეს არ არის საკმარისი იმისათვის, რომ მოხდეს ლითონის სასურველი პომოგენიზაცია ციცხვის მთელ მოცულობაში. გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ციცხეში ხდება ლითონის როგორც განუხანგვა, ასევე ლეგირებაც, რისთვისაც ციცხეში შეგვაქვს საკმაო რაოდენობით განმუხანგველი და მალეგირებელი ელემენტები. ყოველივე ეს კი ზრდის ლითონის არაერთგვაროვნებას. აღნიშნულიდან გამომდინარე, დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ლითონის დამუშავებას ციცხეში ინერტული აირებით. აირებად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს

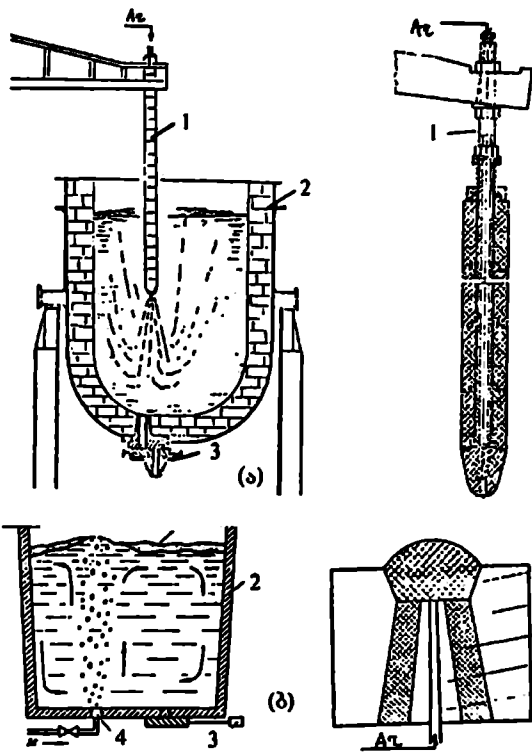
არგონი ან აზოტი. ასეთი დამუშავება საგრძნობლად აკეთილშობილებს თხევად ფოლადს – ამცირებს მასში მანეჟ აირების და არალითონური ჩანართების რაოდენობას, ერთგვაროვანს ხდის როგორც ქიმიური შედგენილობით, ასევე ტექნოლოგიურითაც. აუმჯობესებს საჩამოსხმო თვისებებს. რის შედეგადაც მცირდება წუნის წარმოქმნის ალბათობა როგორც ზოდის, ნახეიარფაბრიკატისა და მზა პროდუქციის ზედაპირზე.

თანამედროვე ფოლადსადნობ საამქროებში ყოვლადის ინერტული აირებით დამუშავებისათვის გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის კონსტრუქციები, რომელთაგან ყველაზე დიდი გავრცელება პოვა ინერტული აირის შებერვამ ცრუ საჩერის ტიპის ჩასაძირი ქშინით და ფოროვანი საცობის მეშვეობით, რომელიც ჩამონტაჟებულია ციცხვის ქვედში (სურ. 8.1). ორივე ტიპის კონსტრუქციას გააჩნია არსებითი ნაკლოვანებები. პირველ შემთხვევაში: 1. სპეციალური ცილინდრული ცეცხლგამძლე აგურის დამზადება, აწყობა, შრობა. 2. შებერვის დროის შეზღუდვა, ქშინის მილის ლითონში ჩაშვების სიმაღლის შეზღუდვა, რაც განაპირობებს არასრულ ტექნოლოგიურ ეფექტს. მეორე შემთხვევაში: 1. ციცხვის ქვედზე სპეციალური ბუდის მოწყობა ფოროვანი საცობის ჩასაძირებლად და დასამაგრებლად. 2. ფხენილოვანი რეაგენტების შებერვის შეუძლებლობა.

მას შემდეგ რაც ციცხვიდან ფოლადის ჩამოსასხმელად საჩერის ნაცვლად გამოყენებულ იქნა შიბერული მოწყობილობა, წამოიჭრა ამ მოწყობილობის მეშვეობით ინერტული აირებისა და ფხენილოვანი რეაგენტების შებერვის იდეა. შემუშავებული და შემოთავაზებულ იქნა სხვადასხვა სახის კონსტრუქციები, რომელთაგან პრაქტიკულად და ტექნოლოგიურად ყველაზე ადვილი განსახორციელებელი და მაღალეფექტური გამოდგა ქართველი მეტალურგების მიერ შემოთავაზებული მეთოდი, რომელიც შემდგომში ცნობილი გახდა როგორც ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების „რუსთაველი მეთოდი“*:

სურათზე 8.2. წარმოდგენილია ციცხვისა და შესაბერი მოწყობილობის ესკიზური ნახაზი. მოწყობილობა საშუალებას იძლევა ლითონი დამუშავებულ იქნეს არა მარტო ინერტული აირებით, არამედ ფხენილოვანი რეაგენტებითაც ($\text{CaO}+\text{CaF}_2$, SiCa , SiCaBaAl , გრაფიტით და სხვა). მოწყობილობის ექსპლუატაციამ თვალნათლივ დაგვანახა მისი უპირატესობანი პრაქტიკაში გამოყენებულ „ცრუ საჩერთან“ შედარებით, სახლდობრ:

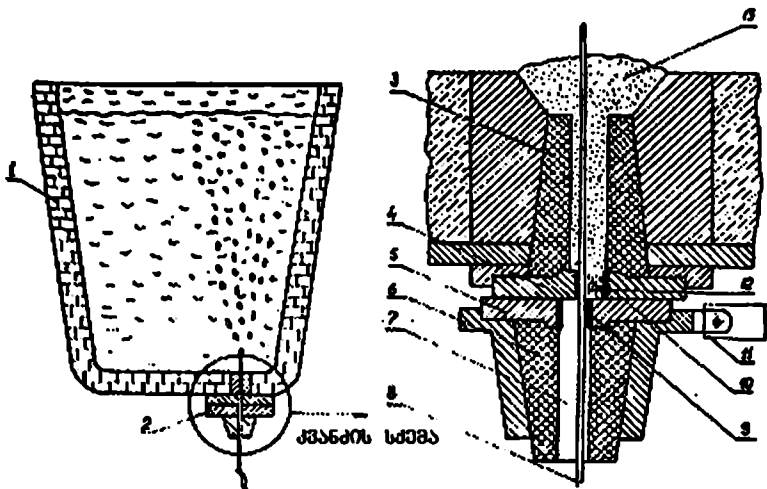
* მეთოდის ავტორებს ა. ბაკურაძეს, ა. გაბისიანს, მ. ლანჩავას, მ. მუმლაძეს, ვ. მოსიაშვილს, გ. ქაშაკაშვილს და თ. შათირიშვილს 1988 წელს მიენიჭათ საქართველოს სახელმწიფო პრემია.



სურ. 8.1. ფოლადის დამუშავება ინერტული აირებით ცრუ საჩერის ტიპის ჩასაძირი ქშინით (ა) და ფოროვანი საცობის მეშვეობით (ბ).
 1 - ცრუ საჩერის ტიპის ქშინი; 2 - ციცხვი; 3 - საშიბერო მოწყობილობა;
 4 - ფოროვანი საცობი; 5 - ფოროვანი ცეცხლგამძლე მასალა; 6 - ცეცხლ-
 გამძლე ბუდე ჩამონტაჟებული ციცხვის ქვედში; 7 - ცეცხლგამძლე აგური;
 8 - ქშინი; 9 - ფოლადის მილი.

1. სიმარტივე. შესაბერი მოწყობილობა ფაქტიურად შედგება 1,5 მ სიგრძის 16 მმ დიამეტრის მქონე ფოლადის მილისაგან, რომელიც მოთავსებულია ციცხვის ცივ ზონაში და ამიტომაც სრულიად გამორიცხულია მისი გადახურების გამო ფხენილოვანი რეაგენტების მილის კედელზე შეცხობა და ამის შედეგად მილის გაჭედვა, რასაც ადგილი აქვს „ცრუ საჩერის“ გამოყენების შემთხვევაში;

2. უნივერსალურობა. შებერვის განხორციელება შეიძლება როგორც ციცხეში თხევადი ფოლადის ჩასხმის დაწყების მომენტიდან, ასევე ამ ოპერაციის დამთავრების - ანუ ციცხვის გაესებისა და სპეციალურ დასადგამზე (სტენდზე) გადატანის (ტრანსპორტირების) შემდეგ.



სურ. 8.2. ციცხვის შიბერული მოწყობილობა აირებისა და ფხენილოვანი რეაგენტების შესაბერი მილით

1. ციცხვი; 2. შიბერული მოწყობილობა; 3. ცეცხლგამძლე ჭიქა; 4. ზემო უძრავი ცეცხლგამძლე ფილა; 5. ქვემო მოძრავი ცეცხლგამძლე ფილა; 6. მოძრავი ცეცხლგამძლე ჭიქა (კოლექტორი); 7. ფოლადის გამოსაშეები არხი; 8. მოწყობილობაში მოთავსებული ფოლადის მილი; 9. ფოლადის რგოლი (მილისი) ჩაჭედილი ქვემო მოძრავ ფილაში; 10. ფოლადის რგოლი (მილისი) ჩაჭედილი ზემო უძრავ ფილაში; 11. შიბერული მოწყობილობის ჩამკეტი მექანიზმი; 12. ცეცხლგამძლე ბამბა; 13. ცეცხლგამძლე ფხეიერი მასა.

3. მოწყობილობა შეიძლება დამონტაჟდეს შიბერული საკეტის ნებისმიერ კონსტრუქციაზე;

4. მაღალი ეფექტურობა. იმის გამო, რომ ფხენილოვანი რეაგენტებისა და აირების შებერვა ხორციელდება ციცხვის ქვედის ყველაზე დაბალი წერტილიდან, დამუშავების ეფექტურობა საგრძნობლად იზრდება.

8.4. ციცხეში ფოლადის გაქრევის ჰიდროდინამიკა

ფოლადის ინერტული აირებით დამუშავების ოპტიმალური ტექნოლოგიური რეჟიმების დასადგენად და პროცესის პროგნოზირებისათვის აუცილებელია ინფორმაცია იმ კონვექციურ ნაკადებზე, რომლებიც წარმოიშობა ლითონში შებერვის დროს.

ცნობილია, რომ ციცხეში თხევადი ფოლადის ინერტული აირის გაქრევის დროს ადგილი აქვს ლითონის გადაადგილებას

აირის ბუშტულების მეშვეობით, რის შედეგადაც ვიღებთ ლითონის ჩამოყალიბებულ ცირკულაციურ მოძრაობას, რომლის ხასიათი დამოკიდებულია შებერვის პირობებზე. ცნობილია გაქრევის ორი რეჟიმი:

1. აირ-ბუშტიანი რეჟიმი, როდესაც აირის ბუშტულის ჩამოყალიბება ხდება შესაბამისად ქშინის ლითონთან შეხების ზედაპირზე, იზრდება გარკვეულ სიდიდემდე და შემდეგ კი მოწყდება ქშინს და იწყებს ზემოთ სვლას;

2. ჭავლური რეჟიმი, როდესაც ქშინიდან გამოსული აირი ქშინს უწყვეტ ნაკადს, რომელიც გარკვეულ სიღრმეში შეღწევის შემდეგ იშლება ცალკეულ ბუშტულებად.

აირის გამოდინების რეჟიმის განმსაზღვრელია ქშინიდან გამოდინების საწყისი სიჩქარე, რომელიც განისაზღვრება შედეგი ფორმულით:

$$W = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \frac{P_0}{P_{\text{ლოთ}}} \right]^{k-\frac{1}{k}}} \quad (8.6)$$

სადაც k არის აირის ადიაბატის მაჩვენებელი (არგონისათვის $k=1,67$, აზოტისათვის $k=1,4$);

R – აირის მუდმივა, კგ·მ/მოლ·გრად;

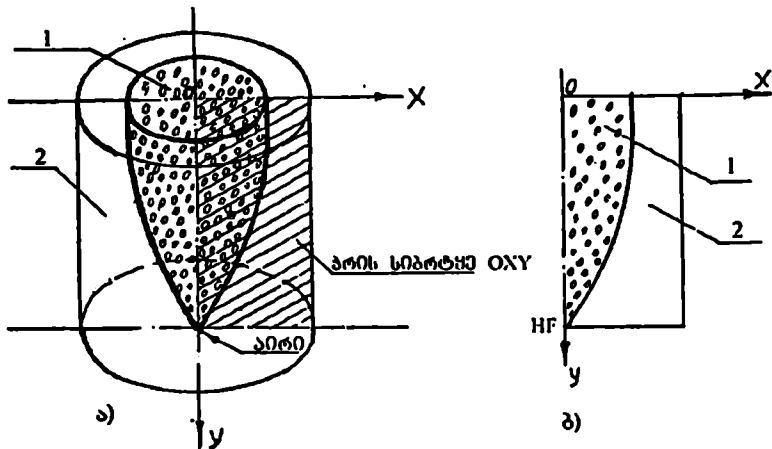
P_0 და T_0 – აირის წნევა (ატმ) და ტემპერატურა (K);

$P_{\text{ლოთ}}$ – თხევადი ლითონის წნევა, ატმ.

შებერვის დროს თხევად ლითონში წარმოიქმნება აირისა და ლითონის ორფაზა ზონა, რომელსაც აქვს შებერვის ღერძის სიმეტრიული პარაბოლოიდის ფორმა (სურ. 8.3).

ციცხვში ლითონის ნაკადების ხასიათისა და სიჩქარეების დასადგენად შეიძლება გამოყენებული იქნეს მათემატიკური მოდელირების მეთოდი, რომელიც საშუალებას იძლევა საკვლევი სისტემა მთლიანად წარმოვადგინოთ სითხის უწყვეტი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებებით ორგანოზომილებიან (OX, OY) ცილინდრულ კოორდინატებში (სურ. 8.3 ბ). ასეთი განტოლებების საშუალებით შეიძლება მივიღოთ ციცხვში ლითონის კონვექციური გადაადგილების სიჩქარეების ეპიურა, რომლის სქემატური ნახაზი წარმოდგენილია სურათზე 8.4.

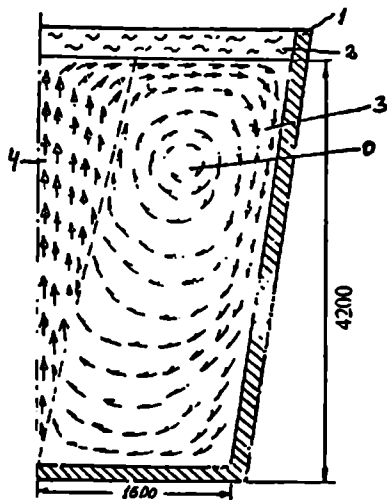
ნახაზიდან ჩანს, რომ ციცხვის ცენტრალურ ნაწილში შესაბერი მოწყობილობიდან ლითონი კონუსური ფორმით მიედინება ქვემოდან ზემოთ. ციცხვის ზემო ნაწილში ლითონის მოძრაობა იცვლის როგორც მიმართულებას, ასევე სიჩქარეს. შემდეგ მიმარ-



სურ. 8.3. ა) ციცხვის სქემა ინერტული აირის შებერვის დროს 1 - ორფაზა ზონა (ლითონი-აირის ბუშტულები); 2 - დანარჩენი ლითონი; OYX - ორგანოზომილებიანი (OY, OX) საკოორდინატო სისტემა; HF - ლითონის სიმაღლე ციცხვში.

თულება კელავ იცვლება და იწყება ლითონის ქვემართ სვლა. ციცხვის ფსკერზე კედელთან წარმოიშევა „მკედარი“ ზონა, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია შებერვის ინტენსივობაზე. სურათიდან ჩანს აგრეთვე, რომ ციცხვის ზემო ნაწილში, ძირიდან დაახლოებით 2/3 სიმაღლეზე, წარმოიშობა წრიული მოძრაობის ზონა, რომლის ცენტრში სითხის მოძრაობა ნულის ტოლია.

ასეთი ეპიურების არსებობა საშუალებას იძლევა შერჩეულ იქნეს განმეანგველი და მალეგირებელი ფეროშენადნობების მიცემის ადგილი და მომენტი, აგრეთვე შესაბერი აირის რაოდენობა და გამოდინების სიჩქარე, რათა



სურ. 8.4. ლითონის ნაკადის სიჩქარეების ეპიურა ციცხვის ინერტული აირებით დამუშავების დროს

1 - ციცხვი; 2 - წიდა; 3 - ლითონის დაღმავალი ნაკადები; 4 - ლითონის აღმავალი ნაკადები; 0 - უძრაობის ზონა

8.5. ფოლადის დამუშავება ციციხეში სინთეზური წიღებით და ფხენილოვანი რეაგენტებით

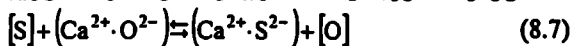
ციციხეში თხევადი ლითონის რაფინირება სინთეზური წიღებით ფოლადის ხარისხის გაუმჯობესების ერთ-ერთ მეტად ხელსაყრელ და ეფექტურ მეთოდს წარმოადგენს. პირველად ეს მეთოდი შექმოთავასებულ იქნა საბჭოთა ინჟინრის ა. ტონინსკის მიერ 1925 წელს. 1928 წელს აღნიშნული მეთოდით საბჭოთა კავშირში მჟავე წიღების გამოყენებით განხორციელდა ბესემერის კონვერტერში გამოდნობილი ფოლადების დეფოსფორაცია და მარტენის ლემელის ფოლადების დიფუზიური განჟანგვა. ამ მეთოდმა პრაქტიკაში გავრცელება ვერ პოვა, რადგან ეს წიღები არ იძლეოდა საშუალებას მოგვეხდინა ლითონის დესულფურაცია.

ამ მიმართულებით ცდები გაგრძელდა ფრანგი მეცნიერის რ. პერენის მიერ, რომელმაც მჟავე წიდა შეცვალა ფუძე კიროვანთიხამიწოვანი წილით, რამაც განგოვირდების საკმაოდ მაღალი ეფექტი აჩვენა. გასული საუკუნის 60-იანი წლებიდან ფოლადის წიღებით დამუშავებამ საკმაოდ ფართო გავრცელება პოვა მეტალურგიულ ქარხნებში.

ციციხეში თხევადი ფოლადის სინთეზური წიღებით რაფინირება ემყარება ფაზებს შორის ნიეთიერებათა წონასწორული განაწილების კანონს. ამ კანონის თანახმად, ურთიერთშეხებაში მყოფ ერთმანეთში უხსნად ორ ფაზაში (ლითონი – წიდა) გახსნილი ნიეთიერებების ქიმიური პოტენციალი მიისწრაფვის გათანაბრებისაკენ და მათი ფარდობა, ანუ განაწილების კოეფიციენტი მოკვეთულ ტემპერატურაზე მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენს. ამ სიდიდის ცოდნა საშუალებას გვაძლევს თეორიულად პროგნოზირებადი გაეხადოთ ლითონში გახსნილი არასასურველი ნიეთიერებების წიდაში გადასვლის რაოდენობა და ამრიგად, რაფინირების პროცესი წარვმართოთ ჩვენთვის სასურველ რეჟიმში.

თხევადი ფოლადის სინთეზური წიღებით დამუშავების მთავარი მიზანია ლითონში გახსნილი გოგირდის წიდაში გადაყვანა.

გოგირდის გადასვლა ლითონიდან წიდაში შეიძლება წარმოდგინილი იქნეს ელექტრო-ქიმიური გაცვლის შემდეგი რეაქციით:



ე.ი. ლითონში გახსნილი გოგირდი წილის და ლითონის შეხების ზედაპირზე იძენს ორ ელექტრონს და გადადის წიდაში, ხოლო წიდაში გამოთავისუფლებული ჟანგბადი გადმოდის ლითონში. (8.7) რეაქციის წონასწორობის მუდმივა შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$K_s^{\nabla} = \frac{a_{(s)} \cdot a_{(O)}}{a_{[S]} \cdot a_{(O)}} = \frac{(\%S) f_{(s)} \cdot [\%O] \cdot f_{(O)}}{[\%S] f_{[S]} \cdot (\%O) f_{(O)}}, \quad (8.8)$$

სადაც $a_{(s)}$, $a_{(O)}$ სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის აქტიურობებია წიდაში;

$a_{[S]}$, $a_{[O]}$ სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის აქტიურობებია ლითონში;

$f_{[S]}$, $f_{[O]}$ სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის აქტიურობების კოეფიციენტებია ლითონში;

$f_{(s)}$, $f_{(O)}$ სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის აქტიურობის კოეფიციენტებია წიდაში;

(%S), (%O) სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის მასური წილებია წიდაში;

[%S], [%O] სათანადოდ, გოგირდისა და ჟანგბადის მასური წილებია ლითონში;

(8.7) ფორმულიდან შეიძლება მიღებული იქნეს გოგირდის წონასწორობის განაწილების მუდმივა (L_s^{∇})

$$L_s^{\nabla} = \frac{(\%S)}{[\%S]} = K_s^{\nabla} \frac{(\%O) f_{(O)} \cdot f_{[S]}}{[\%O] \cdot f_{(s)} \cdot f_{(O)}} \quad (8.9)$$

რეაქცია (8.7) სასურველი მიმართულებით რომ წავიდეს, ანუ გოგირდი ლითონიდან წიდაში მაქსიმალური რაოდენობით რომ გადავიდეს, აუცილებელია რკინაში გახსნილი გოგირდის აქტიურობა და აქტიურობის კოეფიციენტი იყოს მაქსიმალურად დიდი ($f_{[S]} \geq 1$), წიდაში კი – მაქსიმალურად მცირე. ჟანგბადის აქტიურობა და აქტიურობის კოეფიციენტი კი პირიქით – ლითონში მცირე, წიდაში დიდი. აქედან გამომდინარე, ლითონსა და წიდას შორის გოგირდის განაწილების წონასწორობის კოეფიციენტი (L_s^{∇}) დამოკიდებულია როგორც ლითონის, ასევე წილის ქიმიურ შედგენილობაზე. დადგენილია, რომ ლითონში გახსნილი ნახშირბადი, ალუმინი და სილიციუმი ზრდის გოგირდის აქტიურობას და აუზობლებს დესულფურაციის პირობებს. მანგანუმი, კალციუმი, მაგნიუმი და იშვიათ მიწათა ლითონები, პირიქით, ამცირებენ ლითონში გოგირდის აქტიურობას და ხელს უშლიან გოგირდის დიფუზურ გადაადგილებას ლითონიდან წიდაში. ასევე დადგე-

ნილია, რომ ფოლადის განგოგირდების ხარისხი ბევრად არის დამოკიდებული წილის ფუძიანობაზე ანუ წიდაში თავისუფალი CaO-ს რაოდენობაზე. რაც უფრო მეტია წიდაში თავისუფალი CaO, მით უფრო კარგად მიდის დესულფურაცია.

წილის დესულფურაციულ უნარიანობაზე გავლენას ახდენს აგრეთვე წილის სიბლანტე, ზედაპირული და ფაზათაშორისი დაჭიმულობა. რაც უფრო ნაკლებია სიბლანტე, ფაზათაშორისი დაჭიმულობა ლითონსა და წიდას შორის, მით უფრო კარგად მიდის გოგირდის დიფუზური გადაადგილება და დესულფურაციის პროცესი, ასევე კარგად მიმდინარეობს ლითონის გაწმენდა არალითონური ჩანართებისაგან.

დღეისათვის აპრობირებული და შესწავლილია სხვადასხვა შედგენილობის წიდეები. ყველაზე კარგი შედეგებია მიღებული კიროვან-თიხამიწოვან წიდეებზე, რომლებიც შეიცავენ 45-55 % CaO-ს, 15-20 % CaF₂-ს და 20-30 % Al₂O₃-ს. ასეთ წიდეებში რკინისა და სილიციუმის ჟანგეულები შესაბამისად არ უნდა აღემატებოდეს 1-3 % და 3-10 %. წილის რაოდენობა 1 ტონა ლითონზე დამოკიდებულია L_წ-ზე, ლითონში გოგირდის საწყის რაოდენობაზე და იმაზე, თუ როგორი უნდა იყოს გოგირდის საბოლოო შემცველობა ლითონში. ფოლადისათვის საჭირო სინთეზური წილის რაოდენობა შეიძლება გამოვიანგარიშოთ შემდეგი ფორმულით:

$$U = \frac{[\%S_1] - [\%S_2]}{0,01 \cdot L_{წ} [\%S_2]}, \quad (8.10)$$

სადაც U არის წილის რაოდენობა 1 ტ ლითონზე, %;

[S₁] - გოგირდის საწყისი რაოდენობა ლითონში, %;

[S₂] - გოგირდის საბოლოო (სასურველი) რაოდენობა ლითონში, %;

L_წ - გოგირდის წონასწორული განაწილების კოეფიციენტი.

პრაქტიკამ დაგვანახა, რომ თხევადი ფოლადის სინთეზური წილით რაფინირებისას მასში გოგირდის შემცველობა მკვეთრად მცირდება 0,04-0,035-დან 0,005-0,007 %-მდე. აქედან გამომდინარე, საგრძნობლად მცირდება ფოლადში სულფიდური არალითონური ჩანართების რაოდენობაც, უმჯობესდება ლითონის მექანიკური თვისებები.

სინთეზური წიდეებით ფოლადის რაფინირების მაღალი ეფექტურობის მიუხედავად, ამ მეთოდმა ვერ პოვა სათანადო გავრცელება მეტალურგიულ მრეწველობაში. ამის მთავარი მიზეზია სინთეზური წიდეების შემადგენელი კომპონენტების დეფიციტურობა და სიძვირე და ის ორგანიზაციული და ტექნოლოგიური სიძნელეები, რომლებიც დაკავშირებულია წილის გაღობასთან სპეციალურ

სადნობ აგრეგატში, შემდგომ მის ტრანსპორტირებასა და ფოლად-მიმღებ ციცხეში გადასხმასთან. ასეთი სიძნეელების თავიდან ასაცილებლად მოიხინჯა ნაკლებად ძვირადღირებული და არადეფიციტური მყარი წიდაწარმოქმნელი ნარევეები (მ.წ.ნ.). ასეთი წიდეების ძირითადი შემადგენელი ნაწილია ახლად გამოშვარი კირი, რომელიც საკმაო რაოდენობითაა ყველა მეტალურგიულ საწარმოში, მეორადი ალუმინის წარმოების წიდეები, რომლებშიც Al_2O_3 -ის შემცველობა 75 %-მდეა და გარდა ამისა, შეიცავს 10-15 % ლითონურ ალუმინს; წიდის მლღობი CaF_2 შეიძლება მთლიანად ან ნაწილობრივ შეიცვალოს ეულკანური წიდეებით, ან ქარხანაში არსებული სხვა ნარჩენებით, რომლებშიც ბლომადაა მლღობი უანგეულები - Na_2O და K_2O .

წინასწარ გამზადებული მყარი წიდაწარმოქმნელი ნარევი (მ.წ.ნ.) სპეციალური ლითონის ფურცლებისაგან შეკრული, 400-500 °C ტემპერატურამდე გახურებული ყუთის მეშვეობით იყრება ციცხეში ლითონის გამოშვების წინ ან მიეწოდება ლითონის ჭავლს ღუმელიდან გამოშვების მომენტში. ლითონის მაღალტემპერატურული მძლავრი ნაკადი იწვევს ნარევის გადნობას და ახლად წარმოქმნილი წიდის ემულგირებას ლითონის მასაში. რაც იწვევს რა ლითონისა და წიდის ურთიერთქმედების ზედაპირის მკვეთრ ზრდას, ქმნის ხელსაყრელ პირობებს ლითონის რაფინირებისათვის. ლითონის ნაკადის სიმძლავრე მაქსიმალურია ღუმელიდან გამოშვების მომენტში და მონოტონურად მცირდება ციცხვის შევსებასთან ერთად. ასეთ შემთხვევაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ლითონის გაქრევას ინერტული აირით. ციცხვის შევსების დროს ლითონის ჭავლის სიმძლავრის შემცირების პარალელურად იზრდება აირით შებერვის სიმძლავრე და საბოლოო ჯამში იქმნება რაფინირების ხელსაყრელი პირობები. აირის შესაბერი მოწყობილობა საშუალებას იძლევა ინერტულ აირთან ერთად ლითონში შეტანილი იქნეს ფხვნილოვანი მასალები, სახელდობრ: ახლად გამოშვარი კირი, დისპერსული გრაფიტი, ლითონური ალუმინის ფხვნილი, ფხვნილოვანი სილიკოკალციუმი და სხვა მასალები.

ზემოჩამოთვლილი ღონისძიებები სათანადო ეფექტს იძლევა მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ კი აღკვეთილი იქნება მეორადი წიდის ჩადინება ღუმელიდან ციცხეში. წინააღმდეგ შემთხვევაში მოსალოდნელია უკუშედეგი - განგოგირდების დაბალი მაჩვენებელი და ფოსფორის გადასვლა წიდიდან ლითონში, ანუ რეჟოსფორაცია. თანამედროვე ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში ლითონის გამოშვება ხდება ღუმელის ქვედის ცენტრალურ ნაწილში განთავსებული საშიბერო მოწყობილობის მეშვეობით, რომელიც სრულიად გამორიცხავს წიდის მოხვედრას ციცხეში.

ასეთ პირობებში ლითონის დამუშავება წიდაწარმოქმნელი ნარევებით, ინერტული აირით და ფხენილოვანი მასალებით შესაძლებელს ხდის შემცირდეს გოგირდის შემცველობა ლითონში 0,005 %-მდე, არალითონური ჩანართების რაოდენობა დაყვანილი იქნეს მინიმუმამდე - 0,01 %, მოხდეს დეგაზაცია, მიღწეული იქნეს ლითონის ტემპერატურული და ქიმიური ერთგვაროვნება ციცხვის მთელ მოცულობაში, გაუმჯობესდეს ფოლადის საჩამოსხმო თვისებები და ყოველივე ამის შედეგად საგრძნობლად გაიზარდოს მზა პროდუქციის ხარისხი.

8.6. ფოლადის ვაკუუმური დამუშავება ციცხვში და მისი სახეები

თხევადი ფოლადის ვაკუუმურ დამუშავებას ციცხვში საფუძვლად უდევს ფოლადში გახსნილი აირების - წყალბადის, აზოტისა და ჟანგბადის პარციალური წნევის შემცირება ლითონის გარემომცველ არესთან შეხების ზედაპირზე, რაც იწვევს ამ აირების გადასვლას ლითონიდან აიროვან ფაზაში. ვაკუუმირების დროს წყალბადი და აზოტი ელემენტარული სახით გამოიყოფა ლითონიდან, ჟანგბადი კი უერთდება ფოლადში გახსნილ ნახშირბადს და გამოიყოფა ნახშირჟანგის (CO) სახით. ($[O] + [C] = \{CO\}_{გ}$). ნახშირჟანგის ბუშტულების წარმოქმნა და მათი მოძრაობა ლითონის მასაში ქვემოდან ზემოთ ქმნის სასურველ პირობებს ფოლადის დეგაზაციისა და არალითონური ჩანართებისაგან განწმენდისათვის. აღსანიშნავია ისიც, რომ ლითონში გახსნილი წყალბადისა და აზოტის საგრძნობი მოცილება შესაძლებელია მხოლოდ ფოლადის ვაკუუმური დამუშავების შემთხვევაში.

თხევადი ფოლადის ვაკუუმური დამუშავება საწარმოო პირობებში შესაძლებელი გახდა მხოლოდ მის შემდეგ, რაც შეიქმნა ძლიერი და საკმარის ეკონომიური ვაკუუმური ტუმბოები. საწარმოო პირობებში ფოლადის ვაკუუმური დამუშავების პირველი ცდები ჩატარდა საბჭოთა კავშირში ა. სამარინისა და ლ. ნოვიკის ხელმძღვანელობით 1949-1953 წლებში. შემდგომ ამ მეთოდმა სწრაფი განვითარება პოვა ჩეხოსლოვაკიაში, გერმანიაში, შეერთებულ შტატებში და სხვა ქვეყნებში.

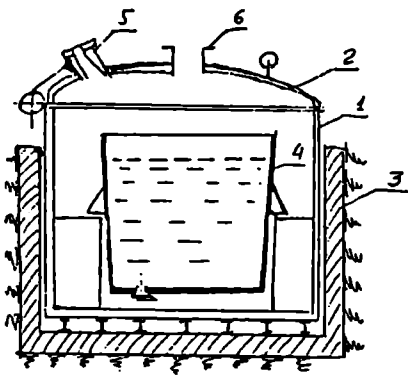
დღეისათვის არსებული ვაკუუმური დანადგარები შეიძლება კლასიფიცირებულ იქნეს შემდეგ სახეებად:

1. ვაკუუმირება ფოლადმიმღებ ციცხვში;
2. ციცხვიდან გამონადენი ფოლადის ჭავლის ვაკუუმირება;

3. ვაკუუმირება ღია ციცხეში პორციებით;

4. ვაკუუმირება ლითონის ჭავლის ინჟექტირებით ღია ციცხვიდან.

შეგნერდეთ თითოეულ მათგანზე ცალ-ცალკე.



სურ. 8.5 ციცხეში ფოლადის ვაკუუმით დამუშავების სქემა

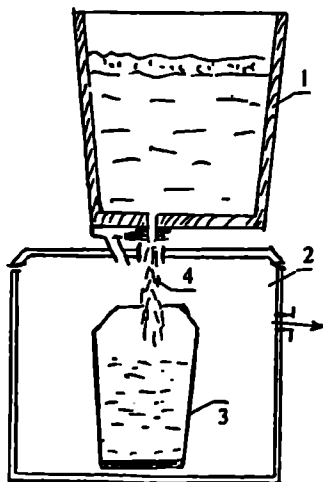
1. ვაკუუმ-კამერა; 2. ვაკუუმ-კამერის სახურავი; 3. ბეტონის ჭა; 4. ლითონით საცხე ციცხვი; 5. საყურებელი ფანჯარა; 6. ვაკუუმ-ტუმბოსთან მისაერთებელი ხერედი

და იხურება. პერმეტულობისათვის სახურავს წრიულად აქვს ჩატანებული წყლით საცივებელი რკინის არხი, რომელშიც მოთავსებულია რეზინის საფენი.

კამერის კედლები შიდა მხრიდან ამოგებულია შამოტის აგურით, ხოლო სახურავი – ქაფშამოტი. ვაკუუმური საქაჩები უზრუნველყოფს წნევის გაიშვიათებას ვერცხლისწყლის სვეტის 9 მმ-მდე. ვაკუუმირების ხანგრძლივობა შეადგენს 15-20 წუთს და ლიმიტირებულია ლითონის ტემპერატურის დაცემით. ვაკუუმირების შემდეგ ლითონს უნდა აქონდეს ჩამოსხმისათვის საკმარისი ტემპერატურა. ვაკუუმირების დროს ლითონი იწყებს დუღილს და მისი დონე ვაკუუმ-კამერაში მყოფ ციცხეში იწევს ზევით 500-600 მმ-დე. ამ მეთოდის უარყოფით მხარედ ითვლება ის, რომ წნევის შემცირება უნდა მოხდეს ნელა, რათა თავიდან იქნეს აცილებული ლითონის გადმოღვრა ციცხვიდან, რაც უდავოდ გამოიწვევს ვაკუუმური კამერის მწყობრიდან გამოსვლას.

ფოლადის ჭავლის ვაკუუმირება. ასეთი მეთოდით ფოლადის ვაკუუმირება ხდება მიმღები ციცხვიდან ფოლადის მეორე ციცხეში

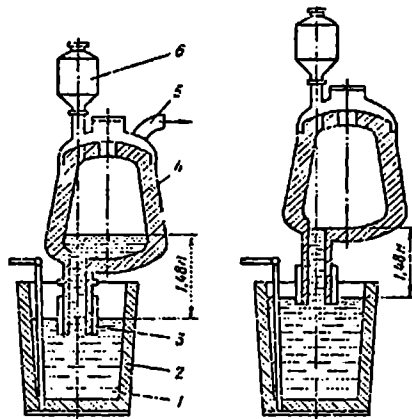
გადასხმის ან პირდაპირ ბოყეში ჩამოსხმის დროს. ასეთ შემთხვევაში მეორე ციცხვი ან ბოყე მოთავსებულია ვაკუუმურ კამერაში, ხოლო თხევადი ფოლადი ძირითადი ციცხვიდან სპეციალური პერმეტული მოწყობილობის მეშვეობით ჩაედინება ციცხვში ან ბოყეში (სურ. 8.6).



სურ. 8.6 ფოლადის ჭაელის ვაკუუმით დამუშავების სქემა
 1. ციცხვი ფოლადით; 2. ვაკუუმ-კამერა; 3. ბოყე ან მეორე ციცხვი;
 4. ფოლადის ჭაელი

ასეთი მეთოდის უპირატესობა ისაა, რომ კამერაში თავიდანვე შეიძლება მიღებული იქნეს დიდი გაიშვიათება. რაც ხელს უწყობს ფოლადის დეგაზაციის ინტენსიურ განვითარებას. როგორც წესი, ასეთი მეთოდით ვაკუუმირებას მიმართავენ მძიმე წონის ზოდების (100 ტ და მეტი) ჩამოსასხმელად. ვაკუუმირების დამთავრების შემდეგ ვაკუუმ-კამერაში ჯერ შეუშვებენ ინერტულ აირს, შემდეგ კი ხსნიან სახურავს. ფოლადით საესე ბოყე მანამდე რჩება ვაკუუმ-კამერაში, სანამ არ დამთავრდება ზოდის კრისტალიზაცია. ეს დრო დიდი წონის ზოდებისათვის 30–40 საათს შეადგენს.

ვაკუუმირება ღია ციცხვში პორციებით, ასეთი ვაკუუმირების დროს (სურ. 8.7) ფოლადით საესე ღია ციცხვში ჩაუშვებენ ცეცხლგამძლე მასალისაგან დამზადებულ მილს, რომელიც წარმოადგენს ვაკუუმ-კამერის გაგრძელებას. მილსა და კამერაში შედის დაახლოებით 4–5 ტონა ლითონი და ხდება მისი დეგა-



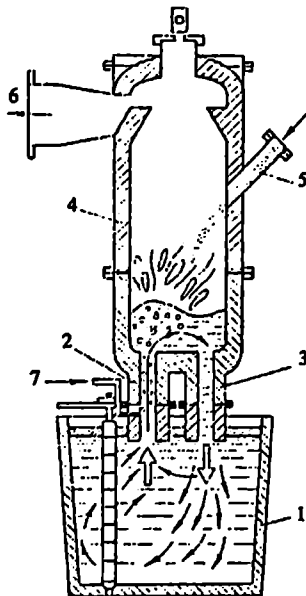
სურ. 8.7 ფოლადის ვაკუუმირება პორციებით

1. ფოლადი; 2. ციცხვი; 3. ორფენოვანი ცეცხლგამძლე მილყელი; 4. ვაკუუმირების კამერა; 5. ვაკუუმური ტუმბოსაკენ; 6. განმჟანგეულების და მალეგირებლების მისაწოდებელი ხვიშირა (ბუნკერი)

ზაცია. ვაკუუმირების ხანგრძლივობა არ აღემატება 1-2 წუთს. შემდგომ ვაკუუმ კამერა ხიდური ამწის მეშვეობით აიწევა ზევით და მასში მოთავსებული ლითონის პორცია ბრუნდება უკან ციცხეში. ასეთი ოპერაციის მრავალჯერადი გამეორებით შესაძლებელი ხდება ლითონის მთლიანი მასის ვაკუუმირება.

ვაკუუმირება ლითონის ჭავლის ინჟექტირებით ღია ციცხვიდან ვაკუუმ კამერაში. ამ შემთხვევაში ვაკუუმ-კამერას აქვს ცეცხლგამძლე მასალისაგან დამზადებული ორი მილი, რომლებიც ჩაშვებულია ლითონით სავსე ციცხეში (სურ. 8.8). ვაკუუმ-კამერის ერთ-ერთ მილზე მიერთებულია მილი, რომლიდანაც მიეწოდება არგონი. არგონის ჭავლი აიძულებს ლითონს იმოძრაოს ციცხვიდან ვაკუუმ-კამერაში და იქედან კი — უკან, ისევ ციცხეში, მეორე მილის მეშვეობით. ვაკუუმირების ხანგრძლივობა არ აღემატება 15 წუთს. ვაკუუმური საქარები ყოველ წუთში უზრუნველყოფს 470 მ³ აირის გადაქარვას, რაც საკმარისია იმისათვის, რომ მოხდეს ლითონის დეგაზაცია.

როგორც უკვე აღინიშნა ზემოთ, ვაკუუმირების მთავარი მიზანია ლითონის დეგაზაცია, ნახშირბადის შემცირება. არალითონური ჩანართებისაგან გაწმენდა. აღსანიშნავია ისიც, რომ ვაკუუმირება საკმაოდ ძვირად ღირებული ღონისძიებაა და მას მიმართავენ მხოლოდ მაშინ, როდესაც საქმე გვაქვს განსაკუთრებით მაღალი ხარისხის ლეგირებული ფოლადის მიღებასთან.



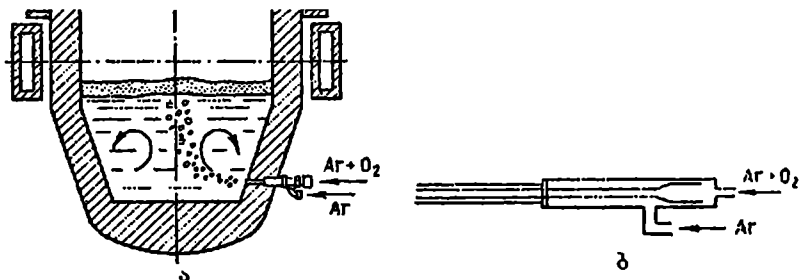
სურ. 8.8 ფოლადის დამუშავება ვაკუუმში ცირკულაციური მეთოდით
 1. ციციხეი თხევადი ფოლადით; 2. ვაკუუმ-კამერის აღმავეალი მილი; 3. ვაკუუმ-
 კამერის დაღმავეალი მილი; 4. ვაკუუმ-კამერა; 5. განმჟანგველების და მადე-
 გირებლების ჩასატვირთი არხი; 6. ვაკუუმ-ტუმბოსთან შესაერთებელი მილი; 7. არგონის მიწოდება.

8.7. ჟანგბად-არგონის ნარევიტ გაქრევა

ზოგ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა ფოლადში ნახშირბადის დაბალი შემცველობა ($<0,03\%$), მიმართავენ ფოლადის გაქრევას ჟანგბად-არგონის ნარევიტ. შესაბერი აირის წნევა ისეთია, რომ მივიღოთ გაქრევის ლამინარული რეჟიმი, რომელიც უზრუნველყოფს ბუშტულების თანაბარ განაწილებას ლითონის მოცულობაში და მათ მოძრაობას ქვემოდან ზემოთ თანაბარი აჩქარებით. ასეთი გაქრევის დროს ნახშირბადის ამოწვა ჟანგბადით $[C]+0,5O_2=CO$ უფრო სრულყოფილად მიმდინარეობს, რადგან არგონით ხდება ნახშირჟანგის განზავება ანუ მისი პარციალური წნევის შემცირება და რეაქციის წონასწორობის გადახრა მარჯვნივ.

ჟანგბად-არგონის ნარევიტ გაქრევა შესაძლებელია როგორც კონვერტერში, ასევე ციციხეში. გაქრევისათვის გამოიყენება სპეცია-

ლური ქმინი, რომელიც შედგება ფოლადის ერთიმეორეში კოაქსიალურად ჩადგმული ორი მილისაგან (სურ. 8.9). ქმინის შიდა მილში მიეწოდება ჟანგბად-არგონის ნარევი, ხოლო გარე მილში არგონი, რომლითაც ხდება შიდა მილის გაცივება (ზოგ შემთხვევაში, გაიაფების მიზნით არგონი შეცვლილია აზოტით) ჟანგბად-არგონის ფარდობას ცვლიან ისე, რომ მაქსიმალურად ამოიწვას ნახშირბადი, რკინის, ქრომის და სხვა კომპონენტების მინიმალური დანაკარგებით. ნახშირბადის ამოწვის პროცესის დამთავრების შემდეგ ლითონის გაქრევას აწარმოებენ მხოლოდ არგონით, რომ მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი ლითონში ჟანგბადისა და სხვა მავნე მინარევების შემცველობა. ჟანგბად-არგონის ნარევით გაქრევა საკმაოდ ეფექტურია, შედარებით იაფია და ამიტომ ბოლო დროს მას დიდი გამოყენება აქვს როგორც კოროზიამედეგი მაღალქრომიანი, ასევე ელექტროტექნიკური, საკონსტრუქციო და სხვა მარკის ფოლადების წარმოებაში.



სურ. 8.9 ჟანგბად-არგონის ნარევით გაქრევა
 ა - ციცხვი (კონვერტერი); ბ - ქმინი

აღნიშნული ტექნოლოგიური პროცესი საშუალებას იძლევა ნახშირბადის შემცველობა ფოლადში შევამციროთ 0,03 %-მდე. ნახშირბადის უფრო დაბალ კონცენტრაციამდე დაყვანა კი შესაძლებელია მხოლოდ ფოლადის ვაკუუმური დამუშავების დროს. ამ ორი პროცესის შერწყმა, ე.ი. ვაკუუმირება და ჟანგბად-არგონის ნარევით გაქრევა უზრუნველყოფს ფოლადში ნახშირბადის მინიმალურ (0,01 %) შემცველობას.

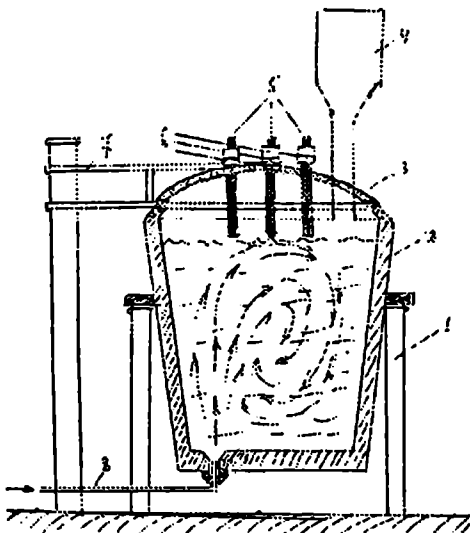
8.8. ციცხვ-ღუმელი

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების დროს ადგილი აქვს თხევადი ფოლადის ტემპერატურის დაცემას, რაც ბევრ შემთხვე-

ვაში ძლიერ ართულებს ფოლადის ჩამოსხმის პროცესის ნორმალურად წარმართვას. ამიტომ, მაშინ როდესაც ტემპერატურის დანაკარგები დიდია, მიმართავენ ციცხეში ლითონის მეორად გახურებას ელექტრორკალის მეშვეობით. სურათზე 8.10 მოცემულია ასეთი დანადგარის სქემატური ნახაზი.

ლითონით სავსე ციცხვი (2) თავსდება სტენდზე (1). სპეციალური მოწყობილობების მეშვეობით (7) ზემოდან ედგმება სახურავი და გრაფიტის ელექტროდებით ხდება ლითონის გახურება. ამავდროულად სპეციალური ხეიმირის მეშვეობით (4) ხდება ფოლადის განუანგვა და ლეგირება.

განუანგვის და ლეგირების შემდეგ, როგორც წესი, აწარმოებენ ლითონის გაქრევას ინერტული აირებით. ასეთი პროცედურა ხელს უწყობს ლითონის ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გაერთგვაროვნებას ციცხვის მთელ მოცულობაში, ამცირებს ფოლადში გოგირდის, აირებისა და არალითონური ჩანართების რაოდენობას და ქმნის სასურველ წინაპირობას მაღალი ხარისხის მზა პროდუქციის მისაღებად.



სურ. 8.10. ციცხე-ლუმელი

1. სტენდი ციცხვის დასადგმელად; 2. ციცხვი თხევადი ლითონით,
3. სახურავი; 4. ხეიმირა ფეროშენადნობებისათვის; 5. ელექტროდები;
6. ტრანსფორმატორიდან მომავალი ელექტროგადამცემები;
7. ელექტროდების და სახურავის გადასაადგილებელი შტანგა;
8. ფოლადის მილი ინერტული აირის და ფხენილოვანი რეაგენტების შესაბერად

8.9. ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების კომპლექსური ტექნოლოგია

თანამედროვე ფოლადსადნობ საამქროებში თითქმის ყველა მარკისა და დანიშნულების მშვიდი ფოლადი გადის ღუმელსგარე დამუშავებას. ცხადია, დამუშავებაში იგულისხმება ფოლადის კანჭანგვა, ლეგირება, ინერტული აირებით და ფხვნილოვანი რეაგენტებით გაქრევა, სინთეზური წიდეებით დამუშავება, ვაკუუმიზაცია, ლითონის ციცხეში გახურება და სხვა.

ზემოთ აღნიშნული პროცედურები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც ცალ-ცალკე, ასევე კომპლექსურად იმისდა მიხედვით, თუ რა დანიშნულებისაა გამოდნობილი ფოლადი და რა მოთხოვნები ექნება წაყენებული მას.

როგორც წესი, ფოლადის მასიური წარმოების დროს მიმართავენ კანჭანგვას, ლეგირებას და ინერტული აირით დამუშავებას. თუ განმუხანგველი და მალეგირებელი დანამატების რაოდენობა დიდია, აუცილებელი ხდება ციცხეში ლითონის ხელმეორედ გახურება ანუ ციცხე-ღუმელის გამოყენება. მაღალი ხარისხის უჭანგავი ფოლადების წარმოების დროს, როდესაც ნახშირბადის შემცველობა ლითონში დასაყვანია 0,03–0,01 %-ის დონეზე, მიმართავენ თხევადი ლითონის დამუშავებას ვაკუუმში და ამავდროულად უნებად-არგონის ნარევით გაქრევას. ვაკუუმურ დამუშავებას მიმართავენ მაშინაც, როდესაც საქმე გვაქვს ფლოკენ-მგრძობიარე ფოლადებთან. ასეთ შემთხვევაში მნიშვნელოვანია არა მარტო წყალბადის რაოდენობის შემცირება ფოლადში, არამედ ასევე სასურველია გოგირდის შემცველობაც იყოს მინიმალური (<0,005 %). ამიტომ ვაკუუმირებასთან ერთად მიმართავენ სინთეზური წიდეებით დამუშავებას და ინერტული აირით გაქრევას.

ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების კომპლექსური ტექნოლოგიის გამოყენების დროს საჭიროა გარკვეული მიმდევრობის დაცვა, სახელდობრ: ღუმელიდან გამოშვებული ლითონის ჭავლზე მიეწოდება წინასწარ 400–500 °C-მდე გახურებული წიდაწარმოქმნილი ნარევი, ამავდროულად ხდება ლითონის გაქრევა ინერტული აირით და ფხვნილოვანი რეაგენტებით. შემდეგ ხდება ლითონის დამუშავება ვაკუუმში, რომელსაც შეიძლება თან ახლდეს ინერტული აირით ან უნებად-არგონის ნარევით გაქრევა. ამ პროცედურის დამთავრების შემდეგ იწყება ლითონის გახურება ელექტრორკალის მეშვეობით და განმუხანგველ-მალეგირებელი დანამატების მიერთვა. საბოლოო ეტაპზე კვლავ ხდება ლითონის გაქრევა ინერტული აირით, რაც ხელს უწყობს თხევადი ფოლადის ქიმიური შედგენილობისა და ტემპერატურის გაერთგვაროვნებას ციცხვის მთელ მოცულობაში.

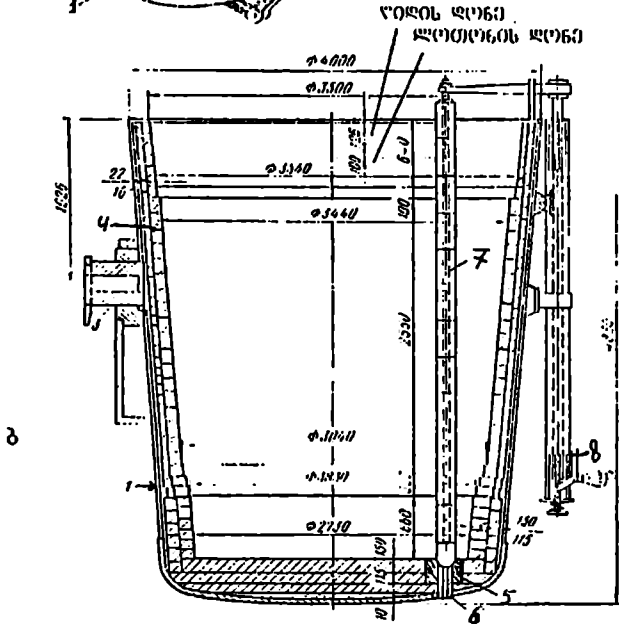
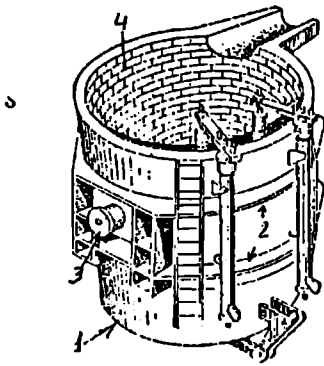
IX ბანყოფილება

ფოლადის ჩამოსხმა და ფოლადის ზოდის კრისტალიზაცია (დაპრისტალეზა)

9.1. ფოლადის ჩამოსხმისათვის საჭირო მოწყობილობა

ღუმელებში გამოდნობის შემდეგ ფოლადი აუცილებლად გადის ტექნოლოგიური პროცესის ბოლო სტადიას – ჩამოსხმას ბოყეებში ან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე სხედასხვა კონფიგურაციისა და სიდიდის ზოდების მისაღებად. ამ ოპერაციის წესიერად წარმართვა მაღალი ხარისხის ზოდების მიღების საწინდარია, რაც საბოლოო ჯამში განაპირობებს საამქროს სასურველ ტექნიკურ-ეკონომიკურ მიწვევებს. ამიტომ გასაგებია ის დიდი ყურადღება, რომელიც ეთმობა ფოლადის წარმოების ამ ბოლო სტადიას. ჩამოსხმის პროცესის ნორმალურად წარმართვა ბეერად არის დამოკიდებული იმაზე თუ როგორ არის მომზადებული ფოლად-მიმღები ციცხვი, როგორი სინქარით ივსება იგი, როგორი სიზუსტითა და მიმდევრობით ხდება ლითონის განქანგვა და ლევირება, წიღით და ინერტული აირით დამუშავება, როგორია ციცხვიში ლითონის დაყოვნების ხანგრძლივობა, როგორი სინქარით მიდის ფოლადის ჩამოსხმა ციცხვიდან ბოყეებში ან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე და სხვა. ყოველივე ზემოაღნიშნულს თან ახლავს ლითონში მიმდინარე რთული ფიზიკურ-ქიმიური პროცესები, რომლებიც განაპირობებულა თხევადი ლითონის ურთიერთქმედებით მალევირებელ და განმქანგველ ელემენტებთან, ატმოსფეროსთან, წიდასთან, ციცხვის ამონაგთან, რაც საბოლოო ჯამში განსაზღვრავს ლითონის ტემპერატურას, ქიმიურ შედგენილობას და, აქედან გამომდინარე, ფოლადის საჩამოსხმო თვისებებს და ზოდის ხარისხს.

ფოლადმიმღები ციცხვი, როგორც წესი, წარმოადგენს წაკვეთილი კონუსის ფორმის მქონე ჭურჭელს, რომლის გაფართოებული ნაწილი ზემოთაა მიმართული (სურათი 9.1). მისი კონუსურობა 3,0–3,5 %-ია. ციცხვის მოცულობა ისეთი უნდა იყოს,



სურ. 9.1 ფოლადმიმღები ციცხვი

ა. დნობის მისაღებად გამზადებული ციცხვის საერთო ხედი
 ბ. ციცხვის ხედი ტრილში

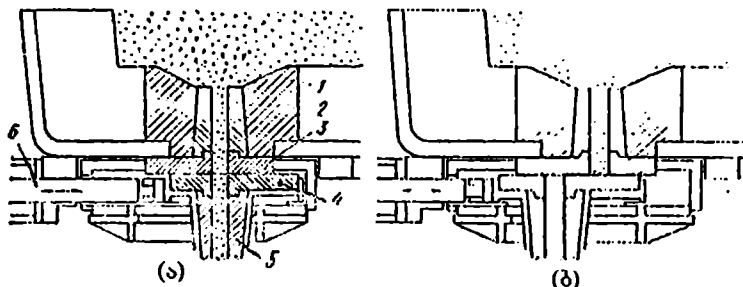
1. გარსაცმი ფურცლოვანი ფოლადისაგან; 2. ფოლადის სარტყელი;
3. პოტოჭიკები (სატაცი); 4. ცეცხლგამძლე აგურის ამონაგი;
5. ოთხკუთხა ბუდე აგური; 6. მაგნეზიტის ჭიქა; 7. საჩერი;
8. ციცხვის კორპუსზე საჩერის დასამაგრებელი მოწყობილობა

რომ ღუმელიდან მთლიანად მიიღოს თხევადი ფოლადი და დაახლოებით ლითონის მასის 1-3 % წიდა. ეს უკანასკნელი ჩამოსხმის პროცესში თხევად ლითონს იკავებს სწრაფი გაცივებისა და დაუანგვისაგან. ღუმელიდან გამონადენი ზედმეტი წიდა დახრილი ღარით სპეციალურ საწიდე ფიალაში გადაიღვრება. თუ ლითონის მიმღებ ციცხეში წინასწარ მოთავსებულია რაფინირებისათვის განკუთვნილი სინთეზური წიდა, მაშინ მიმართავენ ღონისძიებას, რომ ღუმელის წიდა საერთოდ არ მიხედვს ლითონმიმღებ ციცხეში.

ლითონმიმღები ციცხვი შედგება ფურცლოვანი ფოლადის გარსაცმისაგან. ფურცლების სისქე ციცხვის ქვედაზე 26-38 მმ-ია, მხრებზე კი 16-30 მმ. რაც უფრო დიდია ციცხვი, მით მეტია ფურცლების სისქე. ციცხვის ფურცლოვან გარსაცმს შემორტყმული აქვს ფოლადის სარტყელი, რომელზედაც დამაგრებულია პოტოტიკები (სატაკები) ხიდური ამწით ციცხვის გადაადგილებისათვის. შიგა ზედაპირი ამოგებულია ცეცხლგამძლე აგურით. ციცხვის პირველი ფენა ხასიათდება დაბალი თბოგამტარობით, რითაც უზრუნველყოფს ლითონიდან სითბოს ნაკლებ დანაკარგებს. სამუშაო ფენა ამოგებულია შამოტის ან უხვთიხამიწოვანი აგურით, რომელიც გამოირჩევა მაღალი ტემპერატურამდეგობით და სიმტკიცით. პირველ და სამუშაო ფენებს შორის აწყობენ ნორმალური შამოტის აგურების საარმატურო ფენას. ამ ფენის გამძლეობა 12-18 თვით განისაზღვრება. ციცხვის სამუშაო ფენის მედეგობა 10-15 დნობას შეადგენს. ხშირ შემთხვევაში აგურით ამოგებულ ციცხვს უკეთებენ ტორკრეტირებას. სპეციალური ტორკრეტმანქანის მეშვეობით ხდება ციცხვის შიდა ზედაპირის ცეცხლგამძლე ფხვნილოვანი მასალით დაფარვა. ტორკრეტირება მეორდება ყოველი 3-4 დნობის შემდეგ, რაც საგრძნობლად ზრდის ციცხვის სამუშაო ფენის მედეგობას და ხანგრძლივობას (25-30 დნობა). ციცხვის ამონავის სისქე იცვლება ქვემოდან ზემოთ - ქვედის ამონავის სისქე 150-400 მმ-ია. შემდგომ ზემოთ თანდათან (საფეხურებად) მცირდება და 80-250 მმ-ს აღწევს.

ციცხვის ფსკერზე მოთავსებულია შამოტისაგან დამზადებული ხერელიანი ოთხკუთხა ბუდე-აგური, რომლის ხერელშიც იდგმება მაგნეზიტის ჭიქა, საიდანაც ხდება ლითონის ჩამოსხმა. ბოყეებში. ჭიქის ჩასაკეტად გამოიყენება ვერტიკალური საჩერი, რომელიც სპეციალური მოწყობილობით დამაგრებულია ციცხვის გარსაცმზე.

თანამედროვე ციცხეებზე საჩერის ნაცვლად გამოიყენება შიბერული მოწყობილობა (სურ. 9.2.), რომლის მეშვეობითაც ბევრად უფრო ადვილი ხდება ლითონის გამოსაშვები ხერელის



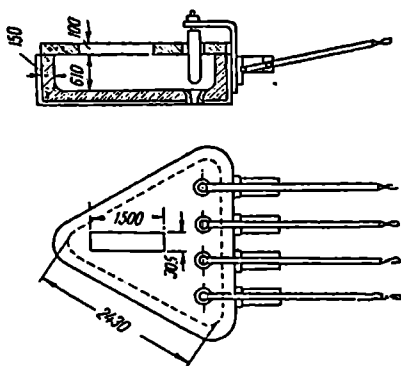
სურათი 92. ციცხეზე დამაგრებული შიბერული მოწყობილობა ღია (ა) და დაკეტილ (ბ) მდგომარეობაში

1. ციცხვის ბუდე აგური; 2. მანგნისიტის ჭიქა; 3. უძრავი ცეცხლგამძლე ფილა; 4. მოძრავი ცეცხლგამძლე ფილა; 5. ჭიქა-კოლექტორი;
6. პიდროცილინდრი

ჩაკეტვა-გაღება. როგორც წესი, საშიბერო მოწყობილობის გამოცვლა ხდება ყოველი დნობის ჩამოსხმის შემდეგ, თუმცა არის შემთხვევები, როდესაც ერთი და იგივე მოწყობილობით იღებენ ორ და მეტ დნობას.

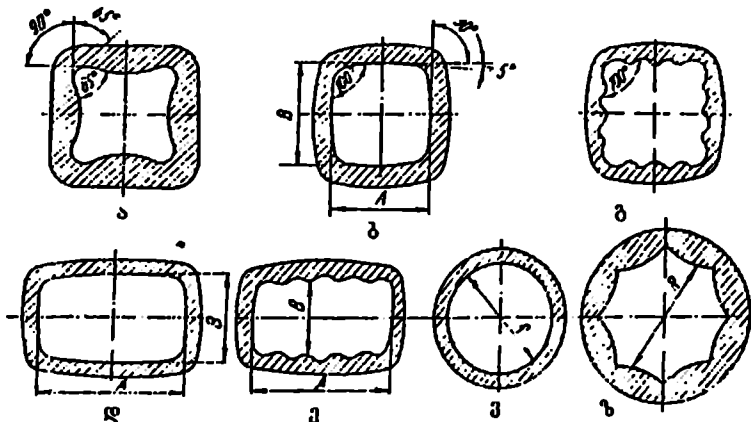
ახლად ამოგებულ ციცხვს ამრობენ და ახურებენ 650–700 C-ზე, ასუფთავებენ შიდა ზედაპირს და ასეთი სახით მიეწოდება დნობის მისაღებად. როგორც წესი, ახლად ამოგებულ ციცხეში იღებენ არასაპასუხისმგებლო დანიშნულების ლითონს. ლითონის მიმღები ციცხვის გარდა საჩამოსხმო მოწყობილობას განეკუთვნება შუალედური ციცხვი (სურ. 93), რომელიც ამოგებულია ცეცხლგამძლე აგურით ან ცეცხლგამძლე სპეციალური ბლოკებით, აქვს ორი ან მეტი გამოსაშვები ხერელი, საიდანაც ხდება ლითონის ჩამოსხმა ბოყეებში ან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე (დანადგარზე). შუალედური ციცხვის ძირითადი დანიშნულებაა მინიმუმამდე შემცირდეს ძირითადი ციცხვის გადაადგილება, ციცხვის გამოსაშვები არხის დაკეტვა-გაღება და ლითონის ფეროსტატიკური წნევა. ეს საშუალებას იძლევა ჩამოსხმა ვაწარმოთ დაბალი სიჩქარეებით, რაც აუცილებელი პირობაა მაღალი ხარისხის ზოდების მისაღებად.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ციცხვიდან ფოლადის ჩამოსხმა ხდება ბოყეებში ან უწყვეტი



სურ. 93. შუალედური ციცხვი

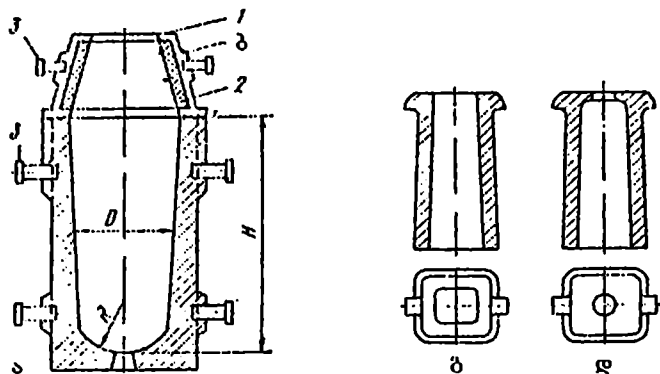
ჩამოსხმის მანქანაზე. თხევადი ლითონის ჩამოსასხმელად განკუთვნილი ბოყვების კონსტრუქცია და კონფიგურაცია მრავალფეროვნებით გამოირჩევა და დამოკიდებულია იმაზე, თუ რა ქიმიური შედგენილობის (მშვიდი, მდუღარე), რა დანიშნულების ნამზადის (კვადრატი, მრგვალი, მართკუთხა) და რა წონის ზოდებია მისაღები ფოლადისაგან. დანიშნულებისა და მიხედვით ბოყვების განივკვეთი შეიძლება იყოს კვადრატული, მრგვალი, მართკუთხა, ოვალური და სხვა (სურ. 9.4).



სურ. 9.4. ბოყვების ტიპური კონსტრუქციები

ბოყვის ზომები შეირჩევა ჩამოსასხმელი ზოდის მასისა და ზომების მიხედვით. თანამედროვე პრაქტიკაში გასაგლინი ზოდის მასა 0,2 ტ-დან 25 ტ-მდე იცვლება, ამასთან ბლუმინგზე გასაგლინი ზოდის მასა 13 ტონამდეა, ხოლო სლაბინგზე გასაგლინი – 25 ტ-მდე. ჭედვისათვის განკუთვნილი ზოდის მასა 25 ტონას აღწევს. არის სპეციალური ბოყვები, რომლებშიც ჩამოსხმება 100–200 ტ ფოლადი მძლავრი ელექტროგენერატორების როტორების დასამზადებლად. გრძივი კვეთის მიხედვით ბოყვები ორ ტიპად იყოფა – ზემოთ გაფართოებული (სურ. 9.5 ა) მშვიდი ფოლადის ჩამოსხმისათვის და ქვემოთ გაფართოებული (სურ. 9.5 გ, დ) მდუღარე და ნახევრადმშვიდი ფოლადის ჩამოსხმისათვის.

ქვემოთ გაფართოებული ბოყვები მზადდება გამჭოლი (ფსკერის გარეშე), ხოლო ზემოთ გაფართოებული – ძირითადად ფსკერიანი, რომელშიც ხერვლია დატოვებული. სიფონური ჩამოსხმის შემთხვევაში ამ ხერვლში შამოტის ჭიქას ათავსებენ (რომლის მეშვეობითაც ფოლადი ბოყვში შედის), ხოლო ზემოდან ჩამოსხმის



სურათი 9.5. მშვიდი და მდულარე ფოლადის ჩამოსასხმელი ბოყეები
 ა - მშვიდი ფოლადის ჩამოსასხმელი ბოყეი; ბ - უესადგამი
 გ - მდულარე ფოლადის ჩამოსასხმელი გამჭოლი ბოყეი
 დ - მდულარე ფოლადის ჩამოსასხმელი ბოთლისებური ბოყეი

შემთხვევაში – ფოლადის საცობს, რომელიც იცავს ბოყეის ფსკერს ფოლადის ჭაეღის დარტყმისაგან.

ბოყეების შიდა ზედაპირს სოგჯერ ტალღისებურს აკეთებენ. ამ შემთხვევაში იზრდება ზოდისა და ბოყეის ზედაპირის შეხების ფართობი, რის შედეგადაც კრისტალიზაციის პროცესი მიმდინარეობს უფრო სწრაფად და იზრდება ზოდის გამაგრებული ქერქის სისქე. ეს უკანასკნელი იცავს ზოდის ზედაპირს გრძივი ბზარის წარმოქმნისაგან.

ზოდის და ბოყეის მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს ბოყეის სიმაღლის (H) ფარდობა მის შიგა დიამეტრთან (D). ფარდობის ზრდა, ე.ი. ზოდის კვეთის შემცირება, გვაძლევს საგლინი დგანების მწარმოებლურობის ზრდის საშუალებას; გარდა ამისა, ამცირებს ზოდის გამყარების ხანგრძლივობას. ეს უკანასკნელი თავისთავად ამცირებს ლიკვაციას. მაგრამ ამავე დროს ამ ფარდობის ზრდა იწვევს ღერძული სიფხვიერისა და განივი ბზარების წარმოქმნისადმი მიდრეკილებას. (H:D)-ს ოპტიმალური მნიშვნელობა მშვიდი ნახშირბადიანი ფოლადებისათვის შეადგენს 3,0–3,5, ხოლო მშვიდი ლეგირებული და ხარისხოვანი ნახშირბადიანი ფოლადისათვის – 2,5–3,3.

მდულარე ფოლადებისათვის ზოდისა და ბოყეის სიმაღლე შეზღუდულია. ბოყეის ძალზე დიდი სიმაღლე ზრდის ზოდის ქვედა ნაწილზე თხევადი ლითონის ფეროსტატიკურ წნევას, რაც აძნელებს ლითონის დუღილს და იწვევს ჯანსაღი ქერქის სისქის შემცირებას.

მშვიდი ფოლადის ზოდებში ღერძული სიფხვიერისა და მაკროსტრუქტურის სიმკვრივეზე დიდ გავლენას ახდენს ბოყვების კონუსურობა — რაც მეტია კონუსურობა, მით მეტია ლითონის სიმკვრივე და ნაკლებადაა განვითარებული ღერძული სიფხვიერე. მიუხედავად ამისა კონუსურობის საგრძნობლად გაზრდა დაუშვებელია, რადგან იწვევს საგლინავ დგანებზე გლინების არათანაბარ დატვირთვას და გლინვის პროცესის არასახარბიელო რეჟიმში წარმართვას. ამასთან დაკავშირებით მშვიდი ფოლადის ზოდებისათვის ბოყვის კედლების კონუსურობა 2–4 %-ის ზღვრებში უნდა იყოს; ჭედვისათვის განკუთვნილი ზოდებისათვის 3–6 %-მდე; ფურცლოვანი ფოლადისათვის — 3–3,5 %.

მდულარე და ნახეერადმშვიდი ფოლადების ზოდების კონუსურობა ნაკლებია, ვიდრე მშვიდი ფოლადებისა და შეადგენს 0,9–1,8 %-ს. ეს უკანასკნელი იძლევა ბოყვებიდან ზოდების თავისუფალი და იოლი ამოღების საშუალებას.

ბოყვების კედლის სისქეს ირჩევენ მისი მექანიკური მდგრადობის მიხედვით და საშუალოდ ზოდის განივკვეთის ფართობის 20 %-ს შეადგენს. ამასთან, ბოყვის მასის ზოდის მასასთან ფარდობა 0,4–1,4-ს უდრის. რაც უფრო მცირეა ზოდი, მით მეტია ეს ფარდობა.

ახალი, ჯერ უხმარი ბოყვების წინასწარი მომზადების პროცესში მათ აცივებენ ჰაერზე, შემდეგ კი წყლის შხაპით. ბოყვის შიგნიდან გასუფთავება მაღალი წნევის წყლის ჭავლით ან ლითონური ჯაგრისით წარმოებს. ამის შემდეგ შიგნიდან გაიჭრევა ჰაერით და შემდეგ, როგორც წესი, ათავსებენ საწყობში დასაძველებლად.

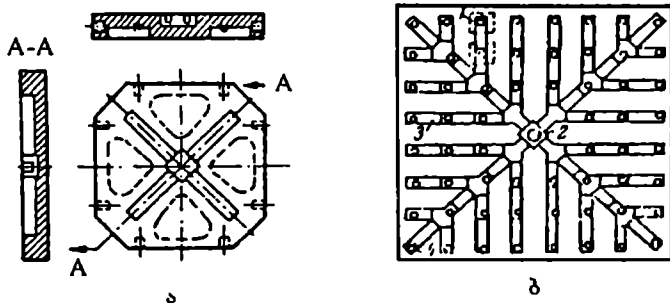
ბოყვების მასალას ძირითადად წარმოადგენს პერლიტურ-ფერიტული სტრუქტურის თუჯი. ბოყვებისათვის რეკომენდებულია შემდეგი შედგენილობის თუჯი: 3,3–4,0 %C, 0,9–2,2 %Si, 0,4–1,0 %Mn, P≤0,2 % და S≤0,1 %. ბოყვების მედეგობა თანამედროვე ქარხნებში 60–100 ჩასხმას შეადგენს, ხოლო ხარჯი ჩამოსხმული ზოდის მასის 1,5–3 %-ია. რაც ნაკლებია ბოყვის წონა, მით მეტია მისი ხარჯი 1 ტონა ფოლადზე. ბოყვების მწყობრიდან გამოსვლა უმთავრესად წარმოებს მის შიგა ზედაპირზე წარმოქმნილი ბზარების შედეგად, რომელთაც იწვევენ თერმული ძაბვები და თხევადი ლითონის ჭავლის უხეში დარტყმები; გარდა ამისა, შიგა ზედაპირზე წარმოქმნილი ამოტყმული ღრმულები, ნიჟარები და ნამწვი ბადის არსებობა.

მშვიდი ფოლადის ჩამოსასხმელად განკუთვნილი ბოყვი, როგორც წესი, ორი ნაწილისაგან შედგება — ძირითადი ტანისა (სურ. 9.5 ა) და სანამატე ზესადგამისაგან (სურ. 9.5 ბ). ზესადგამი

შედგება (კეცხლგამძლე მასით ამოგებული თუჯის გარსაცმისაგან. ყოველი ჩამოსხმის შემდეგ მის ზედაპირს მიახლოებით 10 მმ სისქის (კეცხლგამძლე მასის ფენით ლესავენ. გაჩყარებული 'სოდიდან იოლადა მოცილების მიზნით ზესადგამის შიგა კედლები კონუსური მზადდება (შევიწროვებულია ზევით), კონუსობა შეადგენს 10-18 %-ს.

მსხვილი ზოდების სანამატე ზესადგამის მასა ზოდის საერთო მასის 12-16 %-ს შეადგენს, მცირე ზოდებისა და ლევირებული ფოლადისათვის - 20 %-მდეა. ბოლო წლებში ჩამოსხმის დროს თბოსაიზოლაციო ფხენილოვანი მასალების გამოყენებით ზესადგამში ლითონის მასა საგრძნობლად შემცირდა და ხშირ შემთხვევაში არ აღემატება 10-12 %-ს.

დნობის მისაღებად გამზადებული ბოყეები თუჯის სპეციალურ ფილებზე (ქვეშზე) ეწყობა (სურ. 9.6.), რომლებიც განლაგებულია სარკინიგზო შემადგენლობაზე. ფილების სისქე 100-200 მმ-ის ფარგლებში მერყეობს. სასიფონე გაყვანილობისათვის ქვეშე დატოვებულია სპეციალური ღარები.

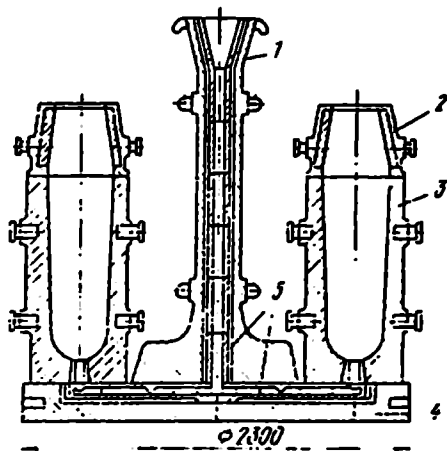


სურ. 9.6. ბოყეების დასადგამი ფილა

ქვეშეები სხმული თუჯისაგან მზადდება. მათი ხარჯი ფოლადის ზოდის მთელი მასის დაახლოებით 0,1-1,0 %-ს შეადგენს. ქვეშის მედეგობის გაზრდისათვის მათი კორპუსი არმირებულია ფოლადის ღეროებით.

ქვეშეებში არსებულ ღარებში ეწყობა შამოტის სასიფონე გაყვანილობა. ქვეშის (კენტრში, სადაც თავს იყრის სასიფონე გაყვანილობის ღარები, თავსდება შამოტის აგურისაგან დამზადებული ვარსკვლავი, რომელსაც გვერდებზე იმდენი ხვრელი აქვს, რამდენი სასიფონე არხიცაა მოთავსებული ქვეშეზე. ამ ხვრელებით თხევადი ლითონი სასიფონე გაყვანილობის მეშვეობით ბოყეებისაკენ მიემართება. ერთ ქვეშეზე შეიძლება მოთავსდეს ორი, ოთხი,

ქვესი ან მეტი ბოყევი. შამოტისაგან დამზადებულ ვარსკვლავს ზემოდან ედგმება საცენტრო (სურ. 9.7), რომელიც შიგნიდან ცეცხლგამძლე შამოტის ხერვლიანი აგურით არის ამოკებული. საცენტროს კედელსა და აგურს შორის მოთავსებულია ცეცხლგამძლე მასა. ჩამოსხმის პირობების გაუმჯობესების მიზნით საცენტროზე მოთავსებულია ძაბრი. აწყობილი საცენტრო შრება სპეციალურ ღუმელში ან სადგამზე და შემდგომ ედგმება ქვეშე. საცენტროს ხარჯი 1 ტ ფოლადზე შეადგენს 0,5–1,2 კგ. საცენტრო 300–400 მმ-ით მაღალი უნდა იყოს სანამატე შესადგამთან ბოყეთან შედარებით, რომ ბოყევის დიფონით შეესება ნორმალურად წარიმართოს.



სურ. 9.7. სიფონური ჩამოსხმისათვის გამზადებული მოწყობილობა
 1. საცენტრო; 2. სანამატე შესადგამი;
 3. ბოყევი; 4. ფილა და მასში მოთავსებული შამოტის აგურის არხები

9.2. ფოლადის ჩამოსხმის სახეები, მათი დადებითი და ნაკლოვანი მხარეები

ამჟამად თხევადი ფოლადის ჩამოსხმას აწარმოებენ ბოყეებში ან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე. ბოყეებში ჩამოსხმის ორი ხერხი არსებობს: ზემოდან ან სიფონით. ზემოდან ჩამოსხმის შემთხვევაში ლითონი ციკხვიდან (შუალედური ციკხვიდან ან ძაბრიდან) უშუალოდ ქვეშე დადგმულ ბოყეში ჩაისხმება. სიფონით ჩამოსხმის შემთხვევაში თხევადი ლითონი ფოლადსასხმელო ციკხვიდან საცენტროში ისხმება და სასიფონე გაყვანილობის მეშვეობით ერთდროულად ავსებს ქვეშე მოთავსებულ რამდენიმე ბოყეს (სურ. 9.7). ამგვარად, ფოლადის სიფონური ხერხით ჩამოსხმა დამყარებულია ზიარტურტლის პრინციპზე.

როგორც მრავალმა კვლევამ დაგვანახა, ლითონის ხარისხის მიწვევებლები და სხმულის ზედაპირის წუნი სხვა ფაქტორებთან

ერთად დამოკიდებულია ჩამოსხმის ხერხზე. ჩამოსხმის ორივე ხერხს გააჩნია როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მხარეები. ამიტომ ირჩევენ ისეთ მეთოდს, რომელიც კონკრეტული შემთხვევისათვის ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით უკეთეს შედეგს იძლევა. შემოდან ჩამოსხმის უპირატესობას შეადგენს:

1. ჩამოსასხმელი მოწყობილობის მომზადების შედარებითი სიმარტივე და დაბალი ღირებულება;

2. ლითონის დანაკარგების შემცირება სასხმო-სიფონური სისტემის უქონლობის გამო;

3. ჩამოსასხამი ლითონის ტემპერატურა შესაძლოა შედარებით ნაკლები იყოს, ვიდრე სიფონური ჩამოსხმისას და სხვა. ამასთან, ლითონის შემოდან ჩამოსხმას გააჩნია რიგი უარყოფითი მხარეებიც:

1. ჩამოსხმული ზოდის ცუდი ზედაპირი (განსაკუთრებით ქვედა ნაწილში), რაც განპირობებულია ბოყვის ძირზე თხევადი ლითონის ჭავლის დარტყმა-გაშხეფებით. დაუანგული და ბოყვის კედლებზე მიყინული ლითონის ნაწილაკები არ იხსნება თხევად ლითონში და ზოდის ზედაპირზე წარმოქმნის ე.წ. ნაკეცებს. ჩამოსხმული ზოდის გაგლინვის პროცესში ეს ნაკეცები არ შეედუღება ძირითად ლითონს, რაც მოითხოვს ნაგლინის ზედაპირის გაწმენდას;

2. ჩამოსხმის პროცესის გახანგძლივება, რასაც მოყვება ტემპერატურის დანაკარგები და სხვა ორგანიზაციული ხასიათის დაბრკოლებები საჩამოსხმო უბანში;

3. ციცხვის ამონაგის მედეგობის შემცირება (პროცესის გახანგძლივების გამო) და შიბერული მოწყობილობის მეორე დნობაზე გამოუყენებლობა მისი ხშირი გაღება-დაკეტვის გამო. სიფონური ჩამოსხმის უპირატესობებია:

1. ერთ ქვეშე ოთხი, ექვსი, რვა და მეტი 3-9 ტონიანი მასის მქონე და მრავალი მცირე ზოდის ჩამოსხმის შესაძლებლობა, რაც საგრძნობლად ამცირებს ჩამოსხმის ხანგრძლივობას;

2. ჩამოსხმული ზოდის ზედაპირის მაღალი სისუფთავე, რაც ამცირებს შრომით დანახარჯებს მის გაწმენდაზე;

3. ჩამოსხმის დროისა და შიბერული მოწყობილობის გახსნა-დაკეტვის რიცხვის შემცირების შედეგად ციცხვის ამონაგის მედეგობის ზრდა და შიბერის მეორე დნობაზე გამოყენების შესაძლებლობა.

ამ მეთოდის უარყოფითი მხარეებია:

1. ბოყვების დადგმისა და სასიფონე სისტემის აწყობის სირთულე და სიძვირე;

2. ლითონის გამოსავლის შემცირება 0,7–2,0 %-ით (რაც განპირობებულია სასხმო სისტემაში ლითონის დანაკარგებით);
3. ცეცხლგამძლე მასალების დიდი ხარჯი.

9.3. ფოლადის ჩამოსხმის ტექნოლოგია

ღუმელიდან გამოსული ფოლადის ტემპერატურა 80–150 °C-ით მეტი უნდა იყოს ფოლადის ლიკვიდუის ტემპერატურაზე. ღუმელიდან ფოლადის გამოშვების შემდეგ რეკომენდებულია 10–15 წუთით მისი ციკხვში დაყოვნება და ინერტული აირითა და ფხვნილოვანი რეაგენტებით დამუშავება. ასეთი ღონისძიება დადებით ზეგავლენას ახდენს ლითონის ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გათანაბრებაზე ციკხვის მთელ მოცულობაში, ქმნის ლითონის რაფინირების ხელსაყრელ პირობებს, ამცირებს გაგირდის, აირებისა და არაღმთონური მანარეთების რაოდენობას ლითონში, აუმჯობესებს ლითონის საჩამოსხმო თვისებებს.

დიდტონაჟიან ციკხვში ლითონის დაყოვნება ჩამოსხმის დამთავრებაამდე 1,5–2 საათს შეადგენს. ამ ხნის განმავლობაში ლითონის ტემპერატურა მცირდება 30–70 °C, ე.ი. 0,4–0,7 °C/წთ სიჩქარით. სიფონური ჩამოსხმის დროს ჩამოსხმის დაწყების ტემპერატურა 90–120 °C-ით მეტი უნდა იყოს ფოლადის ლიკვიდუის ტემპერატურაზე. ხოლო ზემოდან ჩამოსხმის დროს 60–110 °C.

ფოლადის ჩამოსხმის შედარებით უფრო მაღალი ტემპერატურა იწვევს ზოდის ხარისხის გაუარესებას – გადახურებული ფოლადი ბოყეებში დიდხანს ცივდება, იწვევს ზოდის ქიმიური არაერთგვაროვნობის განვითარებას, ჩაჯდომის ნიჟარის გაზრდას და სხვა.

ფოლადის ჩამოსხმა დაბალ ტემპერატურაზე აგრეთვე არასასურველია, რადგან შეიძლება გამოიწვიოს საჩამოსხმო ჭიქაში ლითონის ჭავლის შევიწროება, შესაძლო გაყინვა, შიბერული მოწყობილობის წყობიდან გამოსვლა და, აქედან გამომდინარე, ფოლადის ჩამოსხმა ავარიულ რეჟიმში.

ზოდის ხარისხზე დიდ გავლენას ახდენს აგრეთვე ჩამოსხმის სიჩქარე. სწრაფი ჩამოსხმა ზოდის ზოდის ზედაპირზე გრძივი ბზარების წარმოქმნის შესაძლებლობას, ჩაჯდომის ნიჟარას და ღერძულ სიფხეიერეს. ცხელ (გადახურებულ ფოლადს), როგორც წესი, ასხამენ ნელა, ცივს კი, პირიქით, სწრაფად. უმეტეს შემთხვევაში ჩამოსხმის სიჩქარე 0,15–1,0 მ/წთ-ის ფარგლებში იცვლება; ზოგიერთი მარკის ფოლადის (განსაკუთრებით ეს ეხება ლეგირებულ ფოლადს) ჩამოსხმის სიჩქარე 4–5 მ/წთ აღწევს.

ფოლადის ზემოდან ჩამოსხმის სინქარე შედარებით მაღალია, ვიდრე სიფონურით. ჩამოსხმის სინქარის რეგულირება ხდება შიბერული მოწყობილობის მეშვეობით – ლითონის ჭაველის დიამეტრის შემცირებით ან გაზრდით.

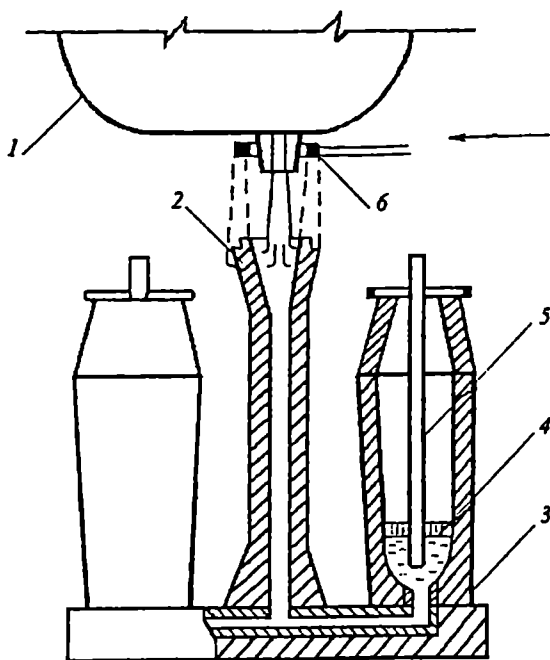
სიფონური ჩამოსხმის შემთხვევაში ბოყეში მოხვედრილი ლითონის პირველი ულუფა გაჭუჭყიანებულია თხევადი ლითონის უშუალო შეხებით აუწიდავ ცივ სასიფონე ზედაპირთან. გარდა ამისა, ლითონის პირველი ულუფები საცენტრე და სიფონურ სადინარებში გრიგალივით შედის, რაც იწვევს მათი კედლების ჩარეცხვას და არასასურველი ნაწილაკებით ფოლადის დაჭუჭყიანებას. აღნიშნული მოვლენის ნეიტრალიზაციისათვის ბოლო წლებში დიდი გამოყენება პოვა ლითონის ჩამოსხმამ თბოსაიზოლაციო ფხვნილოვანი მასალების ქვეშ. ამ მიზნით იყენებენ პერლიტისა და გრაფიტის ნარევს, ვერმიკულიტს ან კიდევ სხვა მასალებს. თბოსაიზოლაციო ფხვნილოვანი მასალის ლითონთან შეხების თხელი ფენა ღლვება და ასიმილირებას უკეთებს ლითონის პირველ ულუფაში გახსნილ ცეცხლგამძლე მასალების ნაწილაკებს. ზემო ფენა კი იცავს ლითონს გაცივებისა და დაჟანგვისაგან. ასეთი მასალების ქვეშ ჩამოსხმული ლითონის ზოდის ზედაპირი ძალიან სუფთაა და გაწმენდას არ მოითხოვს.

როგორც აღინიშნა, მშვიდი ფოლადის ჩამოსხმის შემთხვევაში გამოიყენება ბოყვის თავზე დადგმული სპეციალური სანამატე ზესადგამი, რომელიც აუმჯობესებს ჩაჯდომის ნიჟარის ფორმირებას, სხმულის მკვირვ მაკროსტრუქტურასა და აღნაგობას. როდესაც ლითონი სანამატე ზესადგამში შედის, ჩამოსხმის სინქარეს საგრძნობლად ამცირებენ: შედეგად ზესადგამის შევსების დრო მთელი ბოყვის შევსების 50–75 %-ს შეადგენს. მასში ფოლადი გაცილებით ხანგრძლივად ინარჩუნებს მაღალ ტემპერატურას, იმყოფება თხევად მდგომარეობაში და სხმულის ძირითად ნაწილს თხევადი ლითონით კეებავს. გარდა ამისა, ზოდის გამყარების პროცესში გამოდევნილი ლიკვატები, არალითონური ჩანართები, ბუშტულები და სხვა მინარევები თავს იყრის სწორედ სანამატე ზესადგამში მოთავსებული თხევადი ლითონის მასაში, რომელიც გამყარების მერე ჩამოიჭრება გლინვის პროცესში და ცილდება.

თხევადი ლითონის ზემოდან ჩამოსხმა ხდება როგორც უშუალოდ ფოლადსასხმელი ციცხვიდან ბოყეებში, ასევე მუალედური ძაბრისა. ან ციცხვის გამოყენებით. ჩამოსხმის დასაწყისში ლითონის ჭავლი რამდენადმე მუხრუჭდება და ბოყვის ძირში თხევადი ლითონის ბუფერულ ბალიშს წარმოქმნის, რომელიც იცავს ბოყვის ძროს ლითონის ჭავლით დაზიანებისაგან. შემდგომი

ჩამოსხმა ლითონის მთლიანი ჭავლით მიმდინარეობს. ბოყეების შევსების სიჩქარე, ჩვეულებრივ, 0,3–1,0 მ/წთ მერყეობს. მშვიდი ფოლადის ზემოდან ჩამოსხმის შემთხვევაში სანამატე შესაღამის შევსების ხანგრძლივობა მთელი სხმულის ჩამოსხმის ხანგრძლივობის 50 %-ს შეადგენს. მშვიდი ფოლადის ჩამოსხმის შემდეგ ლითონს ზემოდან აყრიან თბოსაიზოლაციო ეკსოთერმულ ნარეუს, რომელიც ამცირებს სითბოს დანაკარგებს და ხელს უწყობს ჯანსაღი სხმულის ჩამოყალიბებას.

ბოყეებში ჩამოსხმის პროცესში ციცხვიდან გამომდინარე ლითონის ჭავლი შეხებაშია ატმოსფეროსთან და ხდება მისი ინტენსიური დაჟანგვა. ამის თავიდან ასაცილებლად გამოიყენება ჩამოსხმა ნეიტრალურ არეში – არგონის ატმოსფეროში. ბოლო წლებში საკმაო გავრცელება პოვა ბოყეებში ლითონის მოდიფიცირების მეთოდმა (სურ. 9.8). ამ შემთხვევაში ბოყეებში წინასწარ კიდებენ ალუმინის მილს, რომელიც ზემო ბოლოთია დამაგრებული



სურ. 9.8. ფოლადის მოდიფიცირება ბოყეში ჩამოსხმის დროს.

1. ფოლადმიმღები ციცხვი; 2. საცენტრე; 3. ბოყეი; 4. თბოსაიზოლაციო ფხვიერი მასალა; 5. ალუმინის მილი მოდიფიკატორებით; 6. ციცხვის ფსკერზე არგონის მისაწოდებლად დამაგრებული სარტყლისებური მილი.

ბოყეის ზესადგამზე. ალუმინის მილში მოთავსებულია მოდიფიცირებისათვის განკუთვნილი ფხვნილოვანი მასალა – SiCaAl, SiCaBa, SiMgCeLa და სხვა. ბოყეში ლითონის პირველი ულუფის შემოსვლისთანავე ალუმინის მილი დნება და შიგ მოთავსებული მოდიფიკატორები იწყებენ ლითონში გახსნას. ლითონის ზედაპირი დაფარულია თბოსასისოლაკიო ნარკვით, რომელიც საიმედოდ იკავებს როგორც ლითონს, ასევე მოდიფიკატორებს დაქანგვისაგან. ასეთი მეთოდით მოდიფიცირების დროს მინიმალურია მოდიფიკატორების არაშიზნობრივი დანაკარგები (დაქანგვის შედეგად) და მაქსიმალურია მოდიფიცირების ეფექტი: საგრძნობლად მკირდება სოლის როგორც სონალური, ასევე ღერძული ლიკვაკია, მიიღება გლობულარული არალითონური ჩანართები, რომლებიც გლინვის დროს არ განიცდიან დეფორმაციას, საგრძნობლად მკირდება სოლის გამყარების დრო და სხვა.

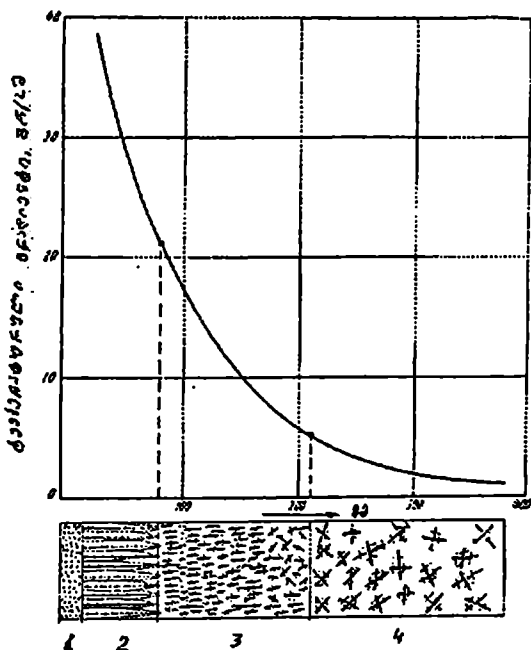
9.4. ფოლადის სოლის კრისტალიზაცია ანუ დაკრისტალება

თხევადი ფოლადი ბოყეში ჩამოსხმის შემდეგ იწყებს გამყარებას. გამყარება მიმდინარეობს კრისტალიზაციის პირველადი ფრონტის გადაადგილებით პერიფერიიდან სოლის ცენტრალური ნაწილისაკენ ორფაზა სონის მეშვეობით, რომელიც წარმოადგენს მყარი დენდრიტული ფორმის კრისტალებისა და თხევადი ლითონის ნარკვს. ორფაზა სონის მასშტაბები (განფენილობა) და ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე, გადახურების ტემპერატურაზე და ლითონიდან სითბოს გაცემის ინტენსივობაზე.

ფოლადის სოლის სტრუქტურის შესწავლამ დაგვანახა, რომ ბოყეებში ფოლადი პირველად კრისტალიზაციას განიცდის სხვადასხვა ფორმის, სიდიდის და ორიენტაციის დენდრიტების სახით, რომელთა ჩაირსახეობა განისაზღვრება გაცივების პირობებით და ლითონის ქიმიური შედგენილობით. სოგადად დენდრიტის* აღნაგობა ხის აღნაგობას წააგავს: თავიდან წარმოიქმნება დენდრიტის ძირითადი პირველადი (პირველი რიგის) ღერძი, რომლის პერპენდიკულარულად იზრდება მეორე რიგის ღერძები ე.წ. დენდრიტების შტოები. ამ შტოების პერპენდიკულარულად კვლავ მესამე რიგის ღერძები იზრდება. ყველა ეს ღერძი დროთა განმავ-

* ბერძნულად δένδρον (დენდრონი) არის ხე.

ლობაში თანდათან მსხვილდება კრისტალებს შორის არსებული თხევადი ლითონის ახალი უღუფუების გამყარების შედეგად და ბოლოს მთლიანად მყარდება. ბოცვში ჩასხმული თხევადი ლითონის გაცივება იწყება ბოცვის კედლებიდან და ძირიდან. გამყარებადი ფოლადის ამ სასაზღვრო ფენაში ლითონის გაცივება იმდენად ინტენსიურია, რომ იქმნება ხელსაყრელი პირობები მრავალი კრისტალის ჩასახვისათვის, იწყება მათი ზრდა არა ორიენტირებული წერილი დენდრიტების სახით (სურ. 9.9). ზოდის გამყარებული ქერქის სისქის ზრდასთან ერთად ფოლადის ტემპერატურის დაცემა ნელდება. ამას ხელს უწყობს ისიც, რომ გამყარებული ლითონი იკუმშება, სცილდება ბოცვის კედელს, რის გამოც სხმულსა და კედელს შორის წარმოიქმნება პაერის სითბო-გაუმტარი შრე. სითბოს გაცემის ინტენსიურობა ლითონის შიდა მოცულობიდან გარე ზედაპირისაკენ მკვეთრად კლებულობს. ეს კი ქმნის ცალკეული დენდრიტული კრისტალის თანამიმდევრობითი



სურ. 9.9. ლითონის გაცივების ინტენსიურობის გავლენა მშვიდი ფოლადის ზოდის კრისტალურ აღნაგობაზე

1. წერილმარცვლოვანი კრისტალები; 2. ტრანსკრისტალიზაციის ზონა;
3. გარდამავალი ზონა; 4. ტოლდურა, არაორიენტირებული დიდი კრისტალები

ზოდის ხელსაყრელ პირობებს და წარმოიქმნება დიდი ზომის, ზოდის ცენტრისაკენ ორიენტირებული, სვეტისებრი (ნემსისებრი, სვეტისმაგვარი), დენდრიტული კრისტალები (2). სვეტისებრი კრისტალების მთავარი ღერძები ერთმანეთის პარალელურია და პერპენდიკულარულად არის მიმართული გამყარების ფრონტისადმი. ამ ზონას სხვაგვარად ტრანსკრისტალიზაციის ზონას უწოდებენ.

გამყარების შემდგომ ეტაპზე ტემპერატურის დაცემის სიჩქარე კიდევ უფრო კლებულობს და მკვეთრად გამოკვეთილი ტრანსკრისტალიზაციის არე გადადის ნაწილობრივ ორიენტირებული დენდრიტული კრისტალების ზონაში (3) კრისტალიზაციის ბოლო სტადიაზე. ზოდის ცენტრალურ ნაწილში ლითონის ტემპერატურული გრადიენტი მინიმალურია, ტემპერატურის გაცემა ყველა მიმართულებით თითქმის ერთნაირია და იქმნება პირობები არაორიენტირებული, დიდი ზომის ტოლღერძა დენდრიტული კრისტალების წარმოქმნისათვის (4).

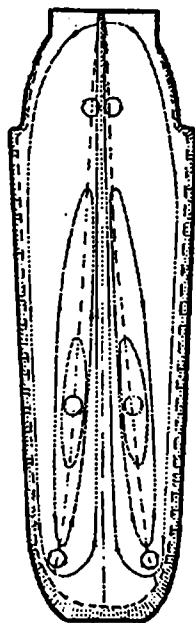
ამრიგად, გამყარების შედეგად ფოლადის ზოდში იქმნება ოთხი ერთმანეთისაგან განსხვავებული ზონა: 1. შედაპირული ზონა (ზოდის ქერქი) მცირე ზომის დენდრიტული კრისტალებით; 2. სვეტისებრი, ზოდის ღერძისაკენ პერპენდიკულარულად მიმართული დენდრიტული კრისტალების ზონა; 3. გარდამავალი ზონა და 4. ცენტრალური ზონა არაორიენტირებული ტოლღერძა დიდი დენდრიტული კრისტალებით. საბოლოო ჯამში ჩვენ ვიღებთ კრისტალური აღნაგობით არაერთგვაროვან ზოდს. არაერთგვაროვნების ხარისხი მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული, მათ შორის ლითონის საწყის ტემპერატურაზე, გაცივების სიჩქარეზე, ორფაზა ზონის არსებობის ხანგრძლივობაზე, ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე, ჩამოსხმის სიჩქარეზე, კონვექციური დინებების ინტენსიურობაზე და სხვა.

დადგენილია, რომ რაც უფრო დაბალია ლითონის ჩამოსხმის ტემპერატურა, ანუ რაც უფრო მცირეა გადახურების ტემპერატურული გრადიენტი და რაც უფრო სწრაფად ხდება გადახურების მოხსნა, მით უფრო სქელია წვრილმარცვლოვანი ზონა და ნაკლებია სვეტისებრი კრისტალების ანუ ტრანსკრისტალიზაციის ზონა. ჩამოსხმის დიდი სიჩქარე, პირიქით, ხელს უწყობს ტრანსკრისტალიზაციის ზონის გაზრდას. დადგენილია აგრეთვე, რომ რაც უფრო ინტენსიურია კონვექციური ნაკადები მით უფრო მცირეა ტრანსკრისტალიზაციის გავრცელების ზონა. სხმული ლითონის სტრუქტურაზე გავლენას ახდენს აგრეთვე ბოყვის კედლის სისქე და მისი სითბოგამტარობა. რაც უფრო დიდია ბოყვის კედლის

სისქე და სითბოგამტარობა, მით უფრო სწრაფად ხდება სხმულის გარე წვრილმარცვლოვანი ზონის ჩამოყალიბება და მით უფრო ფართოა იგი. თუმცა, როგორც ცდება გეიჩენეს, ბოყვის კედლის სისქის ზრდა გარკვეული სიდიდის შემთ (50-55 მმ) აზრს კარგავს, რადგან გამყარებულ ლითონის ქერქსა და ბოყვის კედელს შორის ჩნდება საჰაერო ბალიში, რომელიც ძლიერ ამცირებს სითბოს გადაცემას ლითონიდან ბოყვის კედლებისაკენ.

ლითონის მაკროსტრუქტურა დიდად არის დამოკიდებული ფოლადის ქიმიურ შედგენილობაზე. შემჩნეულია, რომ ქრომნიკელიანი ლეგირებული ფოლადი ხასიათდება მსხვილმარცვლოვანი მაკროსტრუქტურით, რაც აიხსნება აღნიშნული ფოლადის ცუდი სითბოგამტარობით და ლითონიდან ბოყვის კედლისაკენ სითბოს გაცემის დაბალი სიჩქარით. გარდა აღნიშნულისა, რაც უფრო მეტია მყარ ფოლადში უხსნადი მინარევები (ნახშირბადი, ეანგბადი, გოგირდი, ფოსფორი, წყალბადი, აზოტი და სხვა), მით უფრო სრულყოფილად ვითარდება ლიკვაციური მოვლენები – უფრო ხანგრძლივი და მასშტაბურია ორფაზა (მყარ-თხევადი) ზონა და აქედან გამომდინარე, იქმნება ხელსაყრელი პირობები მსხვილმარცვლოვანი სტრუქტურის ჩამოყალიბებისათვის.

ბოყეში მშვიდი ფოლადის ზოდის კრისტალიზაციას თან ახლავს თხევადი ლითონის მოძრაობა თავისუფალი კონვექციით – ზოდის ცენტრალურ ნაწილში ლითონი მოძრაობს ქვემოდან ზემოთ, ხოლო პერიფერიაზე, გამყარების ფრონტის გასწვრივ, ზემოდან ქვემოთ (სურ. 9.10) საწყის სტადიაში დინების სიჩქარე საკმაოდ დიდია (0,4-0,6 მ/წმ), ხოლო შემდგომ, თხევადი ლითონის მოცულობის შემცირებასთან ერთად, მცირდება. ორგანიზებული კონვექციური დინებები ხელს უწყობენ ლიკვაციური მოვლენების განვითარებას ფოლადის ზოდში. სურათზე 9.10 წარმოდგენილი ლითონის მოძრაობის სქემა გეიჩენებს, რომ ზოდის მოცულობაში არის ადგილები, სადაც ხდება ლითონის მოძრაობის მიმართულების შეცვლა, ასევე მისი სიჩქარის



სურ. 9.10. კონვექციური ნაკადების სქემა მშვიდი ფოლადის გამყარებად ზოდში

შემკირება მინიმალურ მნიშვნელობამდე. ეს კი ხელს უწყობს ზოდში ლიკვაციური მოვლენების განვითარებას (ზონალური და ღერძული ლიკვაცია).

9.5. მშვიდი ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა

მშვიდი ფოლადის ზოდის აღნაგობა ცალკეული კრისტალური ზონის გათვალისწინებით შეიძლება აღწერილ იქნეს შემდეგი სქემით (სურ. 9.11):

1. ბოყეის კედელთან შეხების პერიმეტრში, ლითონის სწრაფი გაცივების გამო წარმოიქმნება არაორიენტირებული წერილი კრისტალების ფენა, რომლის სისქე დამოკიდებულია ლითონის გაცივების სინქარეზე და მერყეობს 5–15 მმ-ის ფარგლებში.

2. წერილმარცვლოვანი ფენის შემდგომ, ბოყეის კედლისაკენ პერპენდიკულარულად მიმართული სეგტისებრი დენდრიტული კრისტალების დიდი ზომის არეა, რომლის სიგრძე და სიგანე ასევე დამოკიდებულია გაცივების სინქარეზე. ეს კრისტალები ზოდის სიღრმეში გადაიხრებიან და აქეთ უფრო ფართო განშტოება (3).

3. ზოდის ცენტრალური ნაწილი შედგება დიდი ზომის არაორიენტირებული დენდრიტული კრისტალებისაგან (4).

4. ზოდის ძირში არეა, რომელსაც დაღეკვის კონუსი ეწოდება (5) და რომელიც შედგება წერილმარცვლოვანი დენდრიტული კრისტალებისაგან. ამ კონუსის წარმოქმნა განპირობებულია უპირველეს ყოვლისა იმით, რომ, ამ არეში ლითონის გაცივების სინქარე მაქსიმალურია, რადგან სითბოს გაცემა ხდება როგორც ბოყეის კედლების, ასევე ძირის მიმართულებით. გარდა ამისა აქ ხდება ზოდის ზემო ფენებში წარმოქმნილი მყარი კრისტალების დაღეკვა.

5. ზოდის ზემო ნაწილში განლაგებულია ნაჯდომის ნიჟარა (7), რომელიც წარმოიქმნება მყარი და თხევადი ფოლადის სიმკვრივეთა ურთიერთგანსხეავეების გამო (მყარი ფოლადის სიმკვრივე 3–4 %-ით მეტია თხევადისაზე). ნაჯდომის ნიჟარა ზოდის მთელი სხეულის 2–5 %-ს შეადგენს.

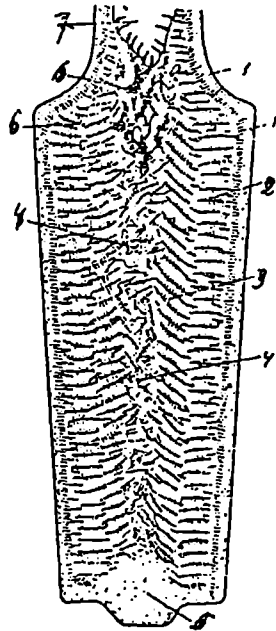
6. ნაჯდომის ნიჟარის ქვემოთ განლაგებულია ღერძული სიფხვიერის არე (6), რომელიც შედგება ლითონის ბოლო უღუფების გამყარების შედეგად მსხვილი დენდრიტული კრისტალებისა და სიკარიელებისაგან. ამ სიკარიელებში, როგორც წესი, თავს იყრის ლითონის შიდა მოცულობებიდან ამოტივტივებული ლიკვა-

ტები, არალითონური ჩანართები და სხვა.

რაც უფრო კარგად არის ორგანიზებული ბოყვის შესადგამში მოთავსებული თხევადი ლითონის თბოიზოლა(ცია, მით უფრო მცირეა ამ არის გავრცელება და მით უფრო ნაკლებია ლითონის დანაკარგი ზოდის შემო ნაწილის ჩამონატერის სახით (გაგლინვის შემდეგ ხდება ბლუმებიდან ამ ნაწილის ჩამოტრა).

ზოდის კრისტალურ არაერთგვაროვნებას, რომელიც თავისთავად არასასურველი მოვლენაა, თან ახლავს ქიმიური არაერთგვაროვნობა. როგორც ცნობილია, თხევად მდგომარეობაში ფოლადი წარმოადგენს მრავალკომპონენტთან ხსნარს, რომლის გამყარება გარკვეულ ტემპერატურულ ინტერვალში მიმდინარეობს. ამასთან წარმოქმნილი პირველი კრისტალები შეიცავს გაცილებით მცირე რაოდენობის მინარევებს, ვიდრე ბოლო. ამრიგად ყალიბდება ზოდის ქიმიური არაერთგვაროვნობა, რომელსაც „ლიკვაციას“ და „სეგრეგაციას“ უწოდებენ.

ლიკვაციის მთავარი მიზეზია ფოლადის შემადგენელი კომპონენტების განსხვავებული ხსნადობა თხევად და მყარ ლითონში. ფოლადი შეიცავს ელემენტებს (ნახშირბადი, ჟანგბადი, გოგირდი, ფოსფორი და სხვა), რომლებიც კარგად იხსნება თხევად ლითონში, მაგრამ ცუდად ან პრაქტიკულად არ იხსნება მყარში. გამყარების დროს კრისტალების წარმოქმნასთან ერთად ხდება ამ ელემენტების გადანაწილება — შედარებით სუფთაა მყარი ლითონი და ლიკვატებითაა გაჯერებული თხევადი ფაზა.



სურ. 9.11. მშვიდი ფოლადის ზოდის კრისტალური აგებულების სქესატური გამოსახულება

1. არაორიენტირებული წრილი კრისტალები; 2. სვეტისებური დენდრიტული კრისტალები, პერპენდიკულარულად მიმართული ზედაპირისკენ;
3. გადახრილი სვეტისებრი დენდრიტული კრისტალები; 4. დიდი ზომის არაორიენტირებული დენდრიტული კრისტალები; 5. დალექვის კონუსში განლაგებული წრილმარცვლოვანი კრისტალები; 6. ღერბული სიფხვიერის არე; 7. ჩაჯდომის ნიჟარა

ფოლადის ზოდში ასხვავებენ მიკრო (დენდრიტულ) და მაკრო (ზონალურ) ლიკვაციას. მიკროლიკვაცია წარმოიქმნება ერთი კრისტალის შიგნით - დენდრიტული ღერძების განშტოებათა შორის, ხოლო ზონალური ლიკვაცია კი სხმულის სხვადასხვა ნაწილის ქიმიური შედგენილობის მნიშვნელოვანი განსხვავების გამო.

ფოლადში გახსნილი ელემენტის სეგრეგაციის რაოდენობრივი შეფასება ხდება მყარ და თხევად ლითონში ამ ელემენტის გადანაწილების წონასწორული კოეფიციენტის დადგენით:

$$K = C_s / C_l$$

სადაც C_s - ელემენტის კონცენტრაცია მყარ ფოლადში, %;

C_l - ელემენტის კონცენტრაცია თხევად ლითონში, %.

ცხრილში 9.1. მოყვანილია ფოლადში გახსნილი ზოგიერთი კომპონენტის წონასწორული კოეფიციენტების მნიშვნელობები.

ცხრილი 9.1

ელემენტების წონასწორული გადანაწილება მყარ და თხევად რკინაში

ელემენტები	წონასწორული განაწილების კოეფიციენტი C	ლიკვაციის კოეფიციენტი 1 - K
ნახშირბადი	0,13	0,87
ჟანგბადი	0,10	0,90
გოგირდი	0,05	0,95
ფოსფორი	0,13	0,87
სპილენძი	0,56	0,44
მანგანუმი	0,84	0,16
სილიციუმი	0,66	0,34

როგორც ცხრილიდან ჩანს, მანგანუმი, სილიციუმი და სპილენძი საკმაოდ კარგად იხსნება როგორც თხევად, ასევე მყარ ლითონში. განსაკუთრებით კარგი ხსნადობით გამოირჩევა მანგანუმი, რომლის ლიკვაციის კოეფიციენტი მინიმალურია. გოგირდი, ჟანგბადი, ნახშირბადი და ფოსფორი კი გამოირჩევა მაღალი მნიშვნელობის ლიკვაციის კოეფიციენტით, რაც მიგვიჩვენებს იმაზე, რომ ზოდში არსებული ლიკვატები ძირითადად შედგება ამ ელემენტების ნაერთებისაგან (კარბიდები, სულფიდები, ოქსიდები, ფოსფიდები).

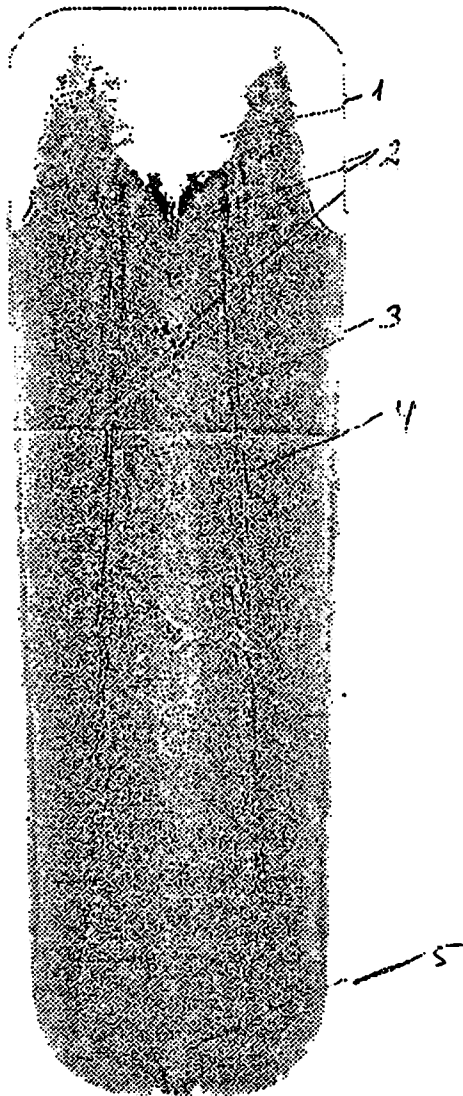
ზონალური ლიკვაციის განვითარებას ხელს უწყობს თხევად ლითონში არსებული კონვექციური ნაკადები. ზოდის ცენტრში აღმავალი ნაკადები იწვევენ ლიკვატების გადაადგილებას ქვემოდან ზემოთ და მათ თავმოყრას ზოდის ზემო ნაწილში, განსაკუთრებით ჩაჯდომის ნიჟარის მიმდებარე არეში. ლითონის ცირკულაცია ასევე იწვევს როგორც ღერძულ, ასევე გარედღერძულ ლიკვაციას.

სურათზე 9.12 მოყვანილია ფოლად 10-ის 6.0-ტონიანი ზოდის გრძივი ჭრილის ბაუმანის ანაბეჭდი, რომელზედაც კარგად ჩანს ღერძული და გარეღერძული ლიკვაცია, აგრეთვე ღერძული სიფხვიერე.

მშვიდი ფოლადის ზოდში მაკროლიკვაციის რამდენიმე ზონაა (სურ. 9.11) ზოდის ქვემო ნაწილში, დალექვის კონუსში (5), ლიკვატების უარყოფითი ზონა შეიმჩნევა. ამ ზონაში ნახშირბადის, გოგირდისა და ფოსფორის რაოდენობა შედარებით მცირეა, ვიდრე ზოდის ზემო ფენებში. უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ ამ ზონაში ძალიან დიდი რაოდენობით გეხედება წერილმარცვლოვანი კორუნდის არალითონური ჩანართები, რომლებიც დაღმავალი კონვექციური ნაკადების წყალობით გამყარების ფრონტთან წარმოქმნილ დენდრიტულ კრისტალებთან ერთად მიემართება ქვემოთ და იქ რჩება კრისტალებში გახლართული. ზოდის ზემო ნაწილში აღინიშნება დადებითი ლიკვაციის სამი ძირითადი ზონა: 1. ჩაჯდომის ნიჟარისა და ღერძული სიფხვიერის მიშდებარე დადებითი ლიკვაციის ზონა. 2. ღერძული „V“-მაგვარი ლიკვაცია (სურ. 9.12-ზე, 3). 3 გარე ღერძული „A“-მაგვარი ლიკვაცია (ეგრეთ წოდებული „ულვაშები“).

ზონალური ლიკვაცია მით უფრო მეტადაა განვითარებული, რაც მეტია ლითონის მასა. ორფაზა არის არსებობის ხანგრძლივობა და ზოდის გამყარების საერთო დრო.

ზონალური ლიკვაცია არასასურველი მოვლენაა და ზოდის კრისტალური და ქიმიური არაერთგვაროვნების შედეგია. ამ მოვლენის შესამცირებლად მიმართავენ გამყარებად ლითონზე სხვადასხვაგვარ ფიზიკურ-ქიმიურ ზემოქმედებას. ასეთ ზემოქმედებად მოიაზრება ბოყეში ჩასხმული ლითონის რხევაში მოყვანა სპეციალური მექანიკური ან ელექტრომაგნიტური მოწყობილობის საშუალებით. ლითონში წარმოქმნილი რხევები ორგანიზებულ კონვექციურ ნაკადებს გარდაქმნის არაორგანიზებულ მოცულობით რხევებად, რაც ხელს უწყობს ტრანსკრისტალიზაციის ზონის შემცირებას და მოცულობითი კრისტალიზაციის განვითარებას. ასეთი რხევები ხელს უწყობს აგრეთვე ჩაჯდომის სიფხვიერის შემცირებას და საერთოდ, სხმულის მკერივი სტრუქტურის ჩამოყალიბებას. ბოლო წლებში განვითარება პოვა ლითონის დამუშავებამ მიკრომაციერებითა და მოდიფიკატორებით. მიკრომაციერებად იყენებენ სუფთა რკინის ფხენილს, რომელიც იყრება ლითონის ჭავლზე სპეციალური როტაციული მანქანის მეშვეობით. თხევად ლითონში მოხვედრილი რკინის ნაწილაკები წარმოადგენს კრისტალიზაციის ცენტრებს და ხელს უწყობს მოცულობითი კრის-



სურათი 9.12. 6-ტონიანი ფოლადის ზოდის გრძივი კვეთის ბაუმანის ანაბეჭდი

1. ჩაჯდომის ნიუარა; 2. ღერძული სიფხვიერე დადებითი ლიკეაცით; 3. ღერძული „V“-ს მაგვარი ლიკეაცია; 4. გარე ღერძული „Λ“-ს მაგვარი ლიკეაცია (უღვაშები); 5. დაღეჭვის კონუსის უარყოფითი ზონა

ტალიზაციის განვითარებას ზოდის მთელ ტანში. მოცულობითი კრისტალიზაციის განვითარება შეიძლება აგრეთვე მოდიფიკატორების გამოყენებით. მოდიფიკატორები, ქიმიურად აქტიური ელემენტები (Ca, Mg, Ce, La და სხვა) შეჰყავთ ლითონში სპეციალური ლენტის ან მილის მეშვეობით. კრისტალიზაციის დაჩქარებასთან ერთად ეს ელემენტები იწვევენ არალითონური ჩანართების გლობულარიზაციას, რომლებიც გლინვის დროს არ განიცდიან დეფორმაციას და ნაკლებად ზემოქმედებენ ფოლადის მექანიკურ თვისებებზე.

ფოლადის დეფექტებს განეკუთვნება გარე და შიდა ბზარები. გარე ბზარები იყოფა გრძივად და განივად. განივი ბზარები წარმოიქმნება ბოყეში ლითონის გამყარების პროცესში ზოდის არათანაბარი ჩამოკიდებით. აღნიშნული შედეგი გამოწვეულია ბოყვის ზესადგამის არასწორი დადგმით და ბოყვის კედლებში არსებულ ბზარებსა და ღრმულებში თხევადი ლითონის შეღწევით.

გრძივი ბზარები ვითარდება ტანგენციალური ძაბვების შედეგად, რომლებიც ზოდის დაკრისტალებისას ლითონის სხედასხვა ფენების არათანაბარი დეფორმაციით წარმოიქმნება. გრძივი ბზარები შეიძლება წარმოიქმნას, აგრეთვე, ზოდის გამყარებულ თხელ ქერქზე თხევადი ლითონის ფეროსტატიკური წნევის შედეგად. ამიტომ ჩამოსხმის სიჩქარის შემცირება და ზოდის სქელი ქერქის წარმოქმნა გვევლინება გრძივი ბზარების წარმოქმნის თავიდან აცილების საშუალებად.

ზოდის ზედაპირულ დეფექტს წარმოადგენს ნაკეცები, რომლებიც ძირითადად ლითონის ზემოდან ჩამოსხმისას წარმოიქმნება. ამ დროს ბოყვის ძირზე ლითონის ჭაელის დარტყმისას წარმოებს მისი გაშხეფება და ნაშხეფის მიკერა ბოყვის კედელზე. დაჟანგული ლითონის შხეფები ზოდის ძირითად მასას არ მიედუღება და წარმოქმნის ე.წ. ნაკეცებს. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად ზემოდან ჩამოსხმას აწარმოებენ დაბალი სიჩქარით და იყენებენ შუალედურ ციცხეს ან ძაბრს.

ზოდის შიდა დეფექტები ყველაზე საშიშია, რადგანაც მათი დანახვა და დაფიქსირება თვალთ შეუძლებელია. ისინი უშუალოდ გლინვის ან ნამზადის მექანიკური დამუშავების პროცესში ჩნდება. ასეთ დეფექტებს ძირითადად წარმოადგენს შიგა ბზარები, რომლებიც წარმოიქმნება ლითონში გოგირდისა და წყალბადის მაღალი შემცველობით ან გლინვის წინ ზოდის ჰაერზე სწრაფი გაცივების შედეგად. შესაძლოა აგრეთვე ზოდის შიგნით ნივარების არსებობა, რაც ლითონში აირების მაღალ შემცველობასა და არასაკმარის განჯანგვასთანაა დაკავშირებული. ყოველი ზემოაღნიშნული

დეფექტი შეიძლება ნაწილობრივ ან მთლიანად იქნეს თავიდან აცილებული, თუ კი დაცული იქნება ჩამოსხმის ტექნოლოგიით გათვალისწინებული ყველა პირობა.

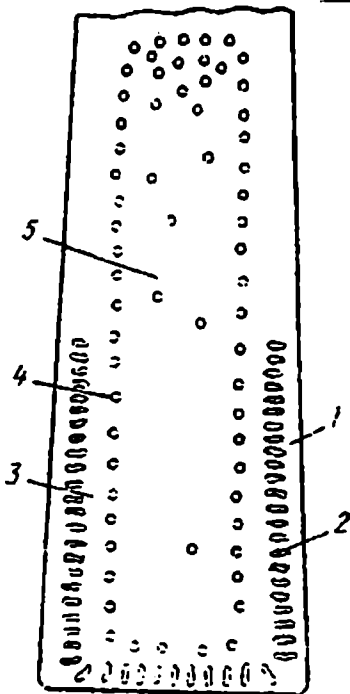
9.6. მდულარე ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა

როგორც ვიცით, მდულარე ფოლადი წარმოადგენს მცირედ განუანგულ ფოლადს. სილიციუმის შემცველობა ამ ფოლადში არ უნდა აღემატებოდეს 0,07 %. ამიტომ მასში გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობა შედარებით მაღალია, ვიდრე მშვიდ ფოლადში. ბოყეში ასეთი გაუჟანგავი ფოლადის ჩამოსხმისას მისი ტემპერატურის ვარდნა იწვევს ლითონში გახსნილი ჟანგბადისა და ნახშირბადის ურთიერთქმედების რეაქციის $[C]+[O]=\{CO\}$ გადახრას CO-ს წარმოქმნისაკენ და ლითონის ე.წ. დუღილს. ამ რეაქციის მიმდინარეობის პროცესში წარმოქმნილი აიროვანი CO ნაწილობრივ გამოიყოფა ატმოსფეროში, ნაწილი კი ვერ ასწრებს გამოყოფას და ბუშტულეების თუ ნიჟარების სახით რჩება სხმულის მოცულობაში. ამრიგად, მიიღება მდულარე ფოლადის ნიჟარებიანი სტრუქტურა. ნორმალურ მდულარე ფოლადის ზოდში ნიჟარები განლაგებულია ქერქის შიდა მოცულობაში, არა აქვთ შეხება ატმოსფეროსთან და ამიტომაც ლითონის გამყარების შემდეგ არ იჟანგება, რაც იძლევა იმის წინაპირობას, რომ გლინვის დროს ნიჟარებიანი ლითონის ზედაპირები კარგად შედუღდეს და მივიღოთ მკვერივი, უდეფექტო ლითონი.

სურათზე 9.13 ნაჩვენებია მდულარე ფოლადის ზოდის სქემატური აღნაგობა. ბოყეში ფოლადის ჩასხმისას კედლებთან თხევადი ლითონის შეხებისთანავე წარმოიქმნება ფოლადის თხელი და მკვერივი ქერქი (1). ამ მომენტში წარმოქმნილი ნახშირჟანგის ბუშტულეები სწრაფად გადაადგილდება თხევადი ლითონის შიდა მოცულობებში. ამ ქერქის სისქე 30–60 მმ-ის ფარგლებში მერყეობს. ქერქის შემდეგ შეიმჩნევა ფიჭისებრი ნიჟარების ზონა (2). ნიჟარების განლაგება ამ ზონაში ემთხვევა წავრძელებული დენდრიტული კრისტალების მიმართულებას. გამოყოფილი CO-ს ნიჟარები იზრდება დენდრიტების ღერძებს შორის. CO-ს ბუშტულეების ნაწილი ასწრებს ამოტივტივებას და ატმოსფეროში გადასვლას. ბუშტულეების ნაწილი, რომელმაც ვერ მოასწრო დენდრიტების ჩაკეტვამდე ამოტივტივება, ლითონში რჩება. ბუშტულეების ფიჭისებრი ზონის სიმაღლე მთელი ზოდის სიმაღლის 2/3-ს შეადგენს.

ეს ნიჟარები ძირითადად განლაგებულია ზოდის ქვედა ნაწილში. ზემო ნაწილი ამ ზონისაგან თავისუფალია, რადგანაც აირის ბუშტულები ასწრებს ლითონიდან გამოყოფას და ატმოსფეროში გადასვლას, რაც ვიზუალურად ლითონის დუღილის მთაბეჭდილებას ქმნის. ზოდის ზედა ღია ნაწილი სითბოს დიდი დანაკარგის გამო სწრაფად ცივდება, მყარდება და დუღილიც წყდება. ამ მომენტში ფიჭისებური ბუშტულების მომდევნო ზონაში წარმოიქმნება ლითონის მკვრივი ფენა (3), რომელიც თავისუფალია CO-ს ბუშტულებისაგან, ხოლო თხევადი ლითონი კი ლიკვაციური მოვლენების გამო მდიდრდება ნახშირბადითა და ჟანგბადით, რაც კვლავ ქმნის $[C]+[O]=\{CO\}$ რეაქციის განახლებას და CO-ს ბუშტულების წარმოსაქმნელად საჭირო პირობებს. შედეგად ზოდში წარმოიქმნება სფეროიდული ფორმის ნიჟარების ზონა (4), რომელიც ზოდის მთელ გრძელ პერიმეტრზეა განლაგებული. ზოდის ცენტრალურ ნაწილში ნიჟარების მცირე რაოდენობა შეიმჩნევა. ზოდის ზედა ნაწილში (თავში), მშვიდი ფოლადის ზოდის სიფხვიერის ანალოგიურად შეიმჩნევა თხევადი ფოლადიდან ამოტივტივებული ჭუჭყისა და ლიკვატების დაგროვება აირის ნიჟარებში (5).

მდულარე ფოლადის ზოდის ხარისხი ძირითადად დამოკიდებულია მკვრივი ქერქის სისქეზე. რაც უფრო მკვრივია ქერქი, მით ნაკლებია ნიჟარების დაჟანგვისა და გლინვის დროს დეფექტების წარმოქმნის საშიშროება. თვით ქერქის ჩამოყალიბების პროცესი ბევრად არის დამოკიდებული ლითონის დუღილის ინტენსიურობაზე. ბოყეებში ლითონის ნე-



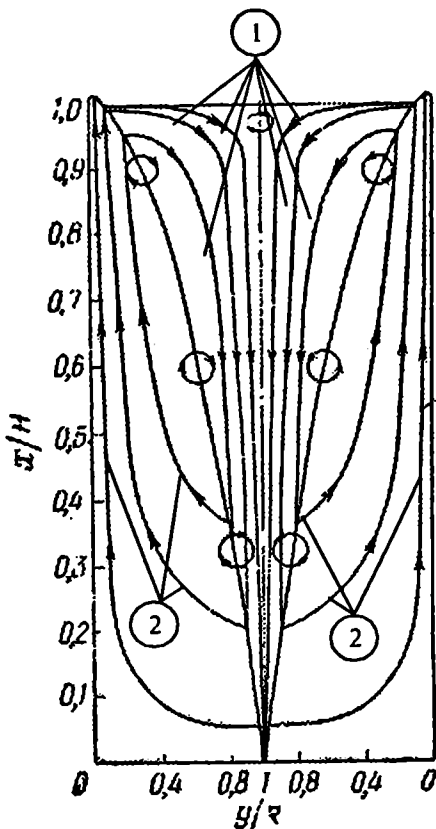
სურ. 9.13. მდულარე ფოლადის ზოდის სქემატური აღნაგობა
 1. ზოდის ქერქი; 2. ფიჭისებრი ბუშტულების ზონა; 3. ლითონის მკვრივი ნიჟარებისაგან თავისუფალი ზონა; 4. სფერული ფორმის ნიჟარების ზონა; 5. ლიკვატებით გაჯერებული ნიჟარების არე

ლი დუღილის დროს ნახშირუანგის ბუშტულები ვერ ასწრებენ ზრდას და ლითონიდან გამოყოფას. ასეთ შემთხვევაში ბუშტულები განლაგდება ზოდის ზედაპირთან ძალიან ახლოს, ზოდის გახურებისა და გლინვის დროს იუანგება და მიიღება ფურჩებიანი ზედაპირის მქონე ნამზადი. ლითონის ნორმალური დუღილი კი, პირიქით, ხელს უწყობს მკერივი სქელი ქერქის წარმოქმნას, რაც იძლევა ხარისხოვანი ნამზადის მიღების გარანტიას. ნელი დუღილი, გარდა აღნიშნულისა, იწვევს ზოდის თავის ამობურცვას, რის შედეგადაც იზრდება ლითონის დანაკარგები გადანატრების სახით.

ცუდ შედეგს იძლევა აგრეთვე გადაჭარბებულად ინტენსიური დუღილი. ამ შემთხვევაში ზოდის ზემო ნაწილში მიიღება ჩაჯდომის ნიჟარის მსგავსი სიცარიელე, რომელიც ქმნის ლითონის ცენტრალური ნაწილის დაუანგვისა და გლინვის დროს განშრეკებული ნაგლინის მიღების საშიშროებას.

გამყარებისას ფოლადში აიროვანი ბუშტულების წარმოქმნა და მათი მოძრაობა ქვემოდან ზემოთ ხელს უწყობს ლითონის ცირკულაციურ მოძრაობას ბოყეში. მშვიდი ფოლადის ზოდისაგან განსხვავებით, მდულარე ფოლადის ზოდში პერიფერიებზე ლითონი მოძრაობს ქვემოდან ზემოთ, ხოლო ცენტრალურ ნაწილში კი ზემოდან ქვემოთ (სურ. 9.14).

თხევადი ფოლადის შერჩევითი კრისტალიზაცია და კონვექციური ნაკადები ხელს უწყობს მდულარე ფოლადის ზოდში ქიმიური არაერთგვაროვნების განვითარებას.



სურ. 9.14. კონვექციური ნაკადების სქემა მდულარე ფოლადის გამყარებად ზოდში 1. ქვემოთ მიმავალი ნაკადები; 2. ზემოთ მიმავალი ნაკადები.

აირების ინტენსიური წარმოქმნა და მათი აღმა სვლა იწვევს ლიკვატებით გაჯერებული ხსნარის გადაადგილებას კრისტალისა ცივის ფრონტის გასწვრივ ქვემოდან ზემოთ. ლიკვატების ნაწილი რჩება ზოდის ზემო ნაწილში, ნაწილი კი ღერძული დაღმავალი ნაკადების მეშვეობით გადაადგილდება ზემოდან ქვემოთ. ლიკვაციური ზონების განლაგება და მათი გავრცელება დამოკიდებულია ბევრ ფაქტორზე, მათ შორის – ზოდის წონაზე და სიმალლეზე, ლითონის ქიმიურ შედგენილობაზე, ჩამოსხმის ტემპერატურასა და სინქარეზე, დუღილის ხანგრძლივობაზე და სხვა.

დადგენილია, რომ რაც უფრო დიდია მღუღარე ფოლადის ზოდის მასა, მით უფრო მეტად ვითარდება ლიკვაციური პროცესები. ფოლადის ხანგრძლივი დუღილი ბოყებში ასევე ხელს უწყობს სეგრეგაციას. დუღილის შესანიერებლად სხვადასხვა ხერხებს მიმართავენ. ასე მაგალითად, მღუღარე ფოლადს ზემოდან აყრიან ლითონური აღუმინის გრანულებს. აღუმინი ურთიერთქმედებს ლითონში გახსნილ უანგბადთან და დუღილი წყდება. ფართოდ გამოიყენება აგრეთვე ლითონის მასიური სარქველები, რომლებიც ზემოდან ეხერება მღუღარე ფოლადის ბოყეს. ასეთი სარქველები იწვევს ლითონის გადაცივებას, წარმოიქმნება მყარი ლითონის მკერვიე ქერქი, ლითონში იზრდება აირების წნევა და დუღილი წყდება. სეგრეგაციული პროცესების განვითარებას ხელს უწყობს აგრეთვე ჩამოსხმის მაღალი ტემპერატურა და დიდი სინქარე.

ფოლადის ქიმიური შედგენილობის ზეგავლენა სეგრეგაციულ პროცესებზე მით უფრო დიდია, რაც უფრო მეტია ლითონში მალი კვირებელი მინარეების (გოგირდი, ფოსფორი, წყალბადი, აზოტი) რაოდენობა.

9.7. ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა

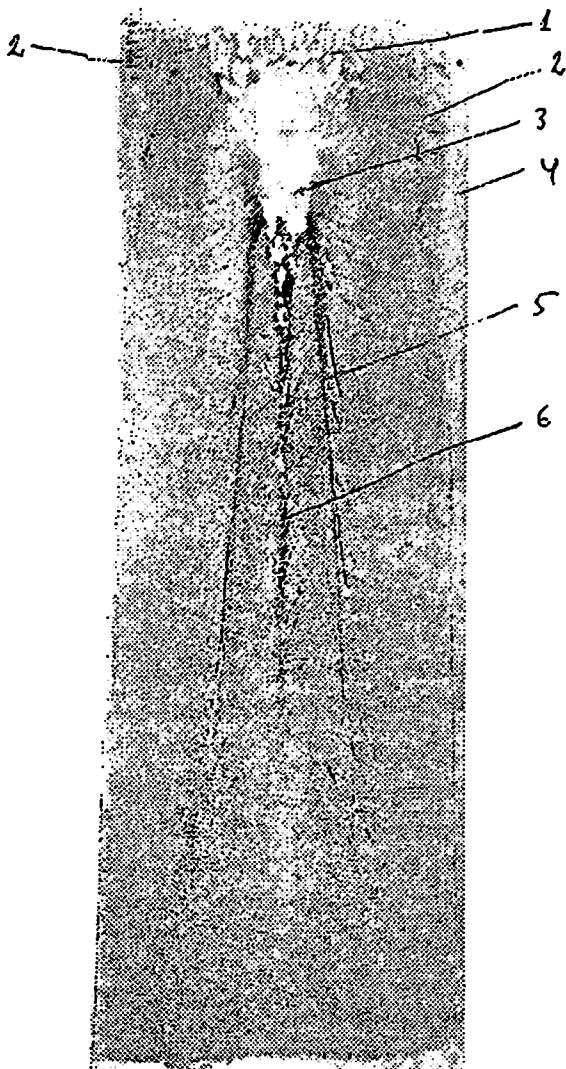
ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის აღნაგობა შუალედურია მშვიდი და მღუღარე ფოლადების ზოდების აღნაგობასთან შედარებით. მშვიდი ფოლადის მსგავსად ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის ზემო ღერძულ ნაწილში მოთავსებულია ატმოსფეროსაგან იზოლირებული ნაჯდომის ნიჟარა, რომლის ვიწრო წაგრძელებული სიკარიელეები საკმაოდ ღრმად ვრცელდება ზოდის სხეულში (კენტრალური ღერძის მიმართულებით (სურ. 9.15). მშვიდი ფო-

ლადის ზოდის მსგავსად მას აქვს მკაფიოდ გამოკვეთილი ზონალური „V“-მაგვარი (უღლეაშები) და ღერძული „Λ“-მაგვარი ლიკვაციური ზონები. მდულარე ფოლადის მსგავსად მას აქვს ფიჭური ბუშტულების ზონა, რომელიც განლაგებულია ზოდის სემონაწილში. ზოდს აქვს აგრეთვე მკერივი ქერქი წვრილმარცვლოვანი დენდრიტული კრისტალებით. ამ ქერქის სისქე ნაკლებია მდულარე ფოლადის ზოდის ქერქის სისქესთან შედარებით და არ აღემატება 20–30 მმ.

ნახევრად მშვიდი ფოლადის განჯანგვა ციკხეში ხდება ფეროსილიციუმის შენადნობით ვარაუდით, რომ ლითონში დარჩეს 0,05–0,15 % Si (ზოგიერთ შემთხვევაში, 0,15 % Si-ის შემცველი ფოლადი ГОСТ 380–88-ის მიხედვით შეიძლება დანიშნოს ტექნიკური კონტროლის განყოფილებაში, როგორც მშვიდი ან ნახევრად მშვიდი). ნახევრად მშვიდი ფოლადი არ არის სრულად განჯანგული და ბოყეებში ჩამოსხმის დროს იწყებს დუღილს, თუმცა დუღილის ინტენსიურობა ბევრად უფრო მცირეა, ვიდრე მდულარე ფოლადის შემთხვევაში. ასეთი ფოლადისათვის დამახასიათებელია საკმაოდ მკერივი, აირის ბუშტულებისაგან თავისუფალი ქვემო ნაწილი და ბუშტულებით გაჯერებული ჩაჯდომის ნიჟარის სემონაწილი, რომელიც თავდება მკერივი ლითონის ხიდით.

ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის ძირითადი დეფექტებია ფიჭური ბუშტულების ზედაპირთან ახლოს განლაგება. რაც ქმნის გაგლინული ლითონის ზედაპირზე დაჯანგული ფურჩების წარმოქმნისა და გახსნილი, ატმოსფეროსთან შეხებაში მყოფი ჩაჯდომის ნიჟარის საშიშროებას. ასეთ შემთხვევაში მიიღება განშრევებული ნაგლინი და ზოდის ნახევარზე მეტი წუნდებული ხდება. ამ დეფექტების თავიდან ასაცილებლად საჭიროა დიდი სიფრთხილე განჯანგვის დროს, რომ ლითონის აირშემცველობა იყოს ოპტიმალური, ბოყეებში დუღილი წარიმართოს ნორმალურად და მივიღოთ მკერივი, აირშეუღწევადი გარე ფენა, რაც იძლევა ხარისხოვანი ნაგლინის მიღების გარანტიას.

უნდა აღინიშნოს, რომ მოთხოვნილება ნახევრად მშვიდ ფოლადზე ძალიან დიდია, რადგან თავისი მექანიკური თვისებებით ის უახლოვდება მშვიდ ფოლადს, ხოლო გამოსავლიანობით – მდულარე ფოლადს.

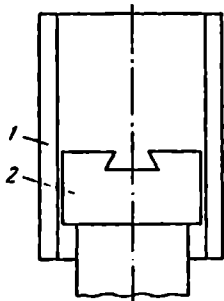


სურ. 9.15. ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის გრძივი კვეთის ბაუმანის ანაბეჭდი

1. ჩაჯდომის ნიჟარის ზემოთ მოთავსებული ნიჟარებიანი ლითონის ხიდი (სარქველი);
2. ფიჭური ბუშტულების ზონა;
3. ჩაჯდომის ნიჟარა;
4. მკვრივი ქერქი;
5. გარე ღერძული „Λ“-მაგვარი ლიკვაცია (უღვაშები);
6. ღერძული „V“-მაგვარი ლიკვაცია

9.8. ფოლადის უწყვეტი ჩამოსხმა

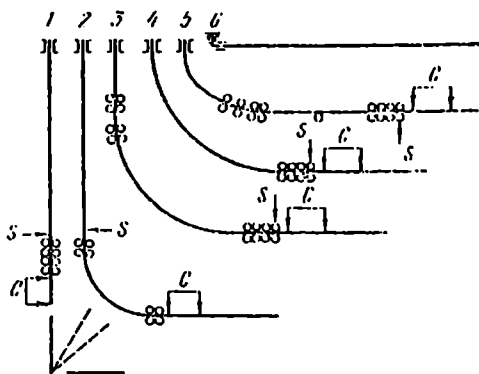
თანამედროვე მეტალურგიულ წარმოებაში ჩამოსხმის მაღალ-ეფექტურ ხერხს წარმოადგენს ფოლადის უწყვეტი ჩამოსხმა, რომელიც თავისი არსებობის 50 წელზე მეტს ითვლის. არსებობს უწყვეტი და ნახევრად უწყვეტი ჩამოსხმა. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთი დნობიდან მივიღოთ ფოლადის უწყვეტი ნაშაღი. მეთოდის არსი მდგომარეობს თხევადი ფოლადის უწყვეტ მიწოდებაში უძირო, წყლით საცვივებელ ბოყეებში – კრისტალიზატორში (სურ. 9.16), რომლის ქვემოდანაც სადელის მეშვეობით უწყვეტად გამოიქანება ნახევრად გამყარებული ზოდი, რომელიც გამყარების შემდეგ მექანიზებულად იჭრება გარკვეულ ზომებზე.



სურ. 9.16. სადელი
1. კრისტალიზატორი;
2. სადელის თავი

თანამედროვე უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანებზე (უნმ) მიიღება სხვადასხვა პროფილის ზოდები – კვადრატული (ბლუმები), მართკუთხა (სლაბები), მრგვალი და რთული კონფიგურაციის.

უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანები იყოფა ხუთ ძირითად ტიპად (სურ. 9.17): ვერტიკალური, ვერტიკალური ზოდის მოხრით, რადიალური, რადიალური მოხრილი კრისტალიზატორით და კორიზონტალური. თუ ციკხეში მითაყსებული თხევადი ფოლადისაგან მიიღება მხოლოდ ერთი ზოდი (ნაშაღი), მაშინ ასეთ ჩამოსხმას ნახევრად უწყვეტ ჩამოსხმას უწოდებენ.

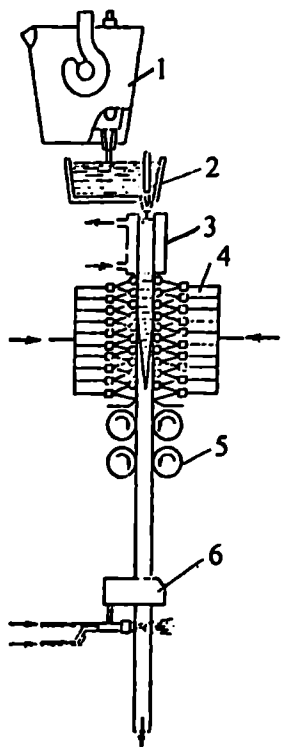


სურ. 9.17. უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანების ნაირსახეობა

ვერტიკალური ტიპის უწყვეტ მანქანებში (სურ. 9.18) ლითონის ჩამოსხმა ხორციელდება შემდეგნაირად: მთავარი ციკხეიდან (1) ლითონი წაედინება შუალედურ ციკხეში (2), საიდანაც იგი ხედება

1. ვერტიკალური; 2. ვერტიკალური ზოდის მოხრით; 3. რადიალური; 4,5. რადიალური მოხრილი კრისტალიზატორით; 6. კორიზონტალური

წყლით საცივებელ ვერტიკალურ კრისტალიზატორში (3). ჩამოსხმის დაწყების წინ კრისტალიზატორში შეაქვთ მისივე განივევითის, ზომისა და კონფიგურაციის სადები (საფულე), რომელიც ფაქტობრივად ასრულებს კრისტალიზატორის ძირის როლს (სურ. 9.16). ჩასხმული ლითონი მიედუღება ამ სადებს და მასთან ერთად იწყება სხმულის გამოქაჩვა სპეციალური გამოქაჩი გლინების (5) მეშვეობით. ნახევრად გამყარებული ზოდი კრისტალიზატორიდან გადადის მეორადი გაცივების ზონაში (4), ხოლო შემდეგ კი - სპეციალურ ჩამჭრელ მოწყობილობაზე (6), სადაც ხდება მისი დაჭრა საჭირო ზომებად და დასაწყობება ან ტრანსპორტირება შემდგომი დამუშავებისათვის საგლინავე საამქროში. ლითონის გადაადგილების გასაადვილებლად კრისტალიზატორი ვიბრირებს და ამავე დროს ასრულებს რხევით მოძრაობას ქვევით-ზევით. კრისტალიზატორის მოძრაობის სიჩქარე ჩამოსხმის ხაზობრივი სიჩქარის ტოლია, რაც უზრუნველყოფს გამყარებული ლითონის საკმაოდ სქელი ფენის წარმოქმნას. თანამედროვე უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანებზე ზოდის გამოქაჩვის სიჩქარეა 1,2-2,0 მ/წთ.



სურ. 9.18. ვერტიკალური ტიპის უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა

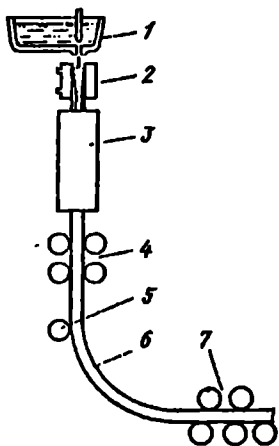
1. ძირითადი ციცხვი; 2. შუალედური ციცხვი; 3. კრისტალიზატორი; 4. კრისტალიზატორის მეორადი გაცივების ზონა; 5. ზოდის გამოქაჩი გლინები; 6. ზოდის ჩამჭრელი მოწყობილობა

ვერტიკალური უჩმის უარყოფით მხარედ უნდა ჩაითვალოს ის, რომ დანადგარის განთავსება მოითხოვს დიდ სიმაღლეს (30-40 მ), რაც ქმნის ბევრ სიძნელეს მისი მშენებლობისა და ექსპლუატაციისას. ამიტომ ბევრ შემთხვევაში გამოყენებაშია ვერტიკალური მანქანა ზოდის მოხრით (სურ. 9.19). ასეთ მანქანას აქვს სპეციალური მოსახრელი მექანიზმი, რომლის მეშვეობითაც უკვე გამყარებული ზოდი ვერტიკალური მდგომარეობიდან გადააყვავთ პორიზონტალურ მდგომარეობაში და შემდეგ ხდება მისი დაჭრა და დასაწყობება.

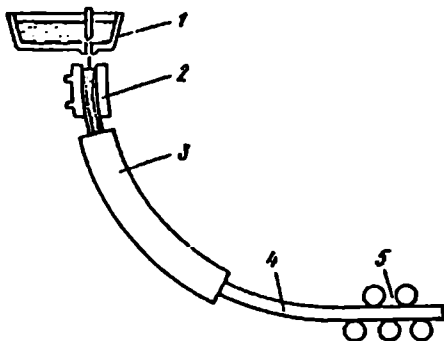
საკმაოდ დიდი გავრცელება პოვა რადიალური ტიპის მანქანამ მოხრილი კრისტალიზატორით (სურ. 9.20). ასეთი მანქანების განთავსება საამქროში ბევრად უფრო ადვილია და ეკონომიურად გამართლებული. ხშირ შემთხვევაში, წარმადობის გაზრდის მიზნით, ჩამოსხმას აწარმოებენ რამდენიმე კრისტალიზატორში ერთდროულად. ამისათვის გამოიყენება შუალედური ციცხვი, რომელსაც რამდენიმე გამოსაშვები ხვრელი აქვს (სურ. 9.21). შუალედური ციცხვი საშუალებას იძლევა რეგულირებადი გახედვს ძირითადი ციცხვიდან ლითონის მიწოდება, გადაანაწილდეს იგი რამდენიმე კრისტალიზატორზე თანაბარი რაოდენობით და ჩამოსხმა წარიმართოს ლითონის დაბალი ფეროსტატიკური წნეკით.

უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე ჩამოსხმას შუალედური ციცხვის 2/3 სიმაღლეზე ლითონით შევსებით იწყებენ. ამასთან ლითონის ტემპერატურა ჩამოსხმის პროცესში 30 °C-ით მეტი უნდა იყოს, ვიდრე ბოყვებში სიფონური ჩამოსხმის დროს. ხარისხიანი ზოდის მისაღებად აუცილებელ პირობას წარმოადგენს ჩამოსხმისას კრისტალიზატორში თხევადი ლითონის მუდმივი დონის არსებობა, რომელიც კრისტალიზატორის ზემო ტორსიდან 100–150 მმ დაბლა უნდა იყოს.

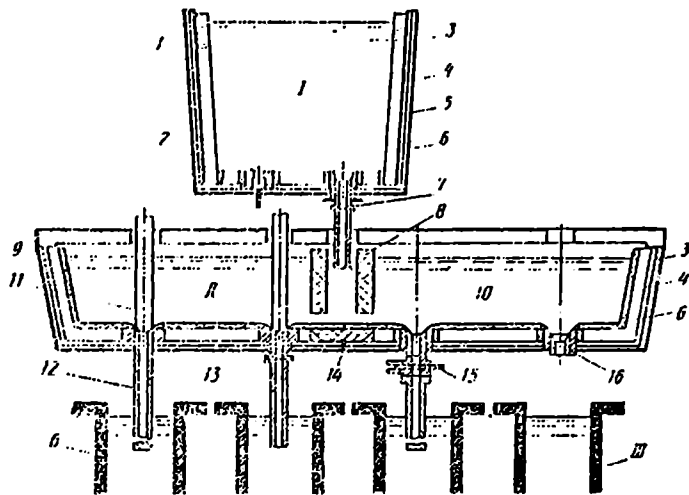
უწყვეტი ჩამოსხმის დროს დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე იმას, რომ თავიდან იქნეს აცილებული ლითონის მეორადი დაჟანგვა. ამისათვის გამოიყენება სპეციალური ცეცხლგამძლე ჭიქები, რომ-



სურ. 9.19. ვერტიკალური მანქანა ზოდის მოხრით
1. შუალედური ციცხვი;
2. კრისტალიზატორი;
3. მეორადი გაცივების არე; 4. გამომქანი გლინები; 5. მომლუნი გლინი; 6. ზოდი; 7. გამასწორებელი გლინები



სურ. 9.20. რადიალური მანქანა მოხრილი კრისტალიზატორით
1. შუალედური ციცხვი; 2. რადიალური კრისტალიზატორი; 3. მეორადი გაცივების არე; 4. ზოდი; 5. გამომჭიმი-გამასწორებელი გლინები



სურ. 9.21. შუალედური ციცხვი ოთხი ჩამოსასხმელი არხით
 1 - ძირითადი ციცხვი; 2 - შუალედური ციცხვი; 3. კრისტალიზატორები

ლებიც უკეთდება როგორც ძირითად, ისე შუალედურ ციცხვს (სურ. 9.21). როგორც სურათიდან ჩანს, ჭიქების ბოლოები ჩაშვებულია ლითონში, რაც გამორიცხავს ჭაელის ატმოსფეროსთან შეხებას, გარდა ამისა, ლითონის ზედაპირი შუალედურ ციცხვში და კრისტალიზატორში იფარება წიღური ნალღობით და თბოსაიზოლაციო ფხვნილოვანი ნარევეთ. ზოგ შემთხვევაში ჩამოსხმას აწარმოებენ ნეიტრალურ ატმოსფეროში - კრისტალიზატორში შეუბერავენ არგონს. ჩამოსხმის დაწყების მომენტიდან კრისტალიზატორის ზედაპირი ავტომატურად იხეთება პარაფინით ან სხვა სპეციალური სახის ზეთით, რომ თავიდან იქნეს აცილებული ლითონის მიკერა კრისტალიზატორის ზედაპირზე.

ჩვეულებრივ ჩამოსხმასთან შედარებით უწყვეტი ჩამოსხმის მეთოდს შემდეგი ძირითადი დადებითი თვისებები ახასიათებს:

1. ერთ ტონა მზა ფოლადზე ლითონის დანაკარგების საგრძნობი შემცირება (ბოყეებში ჩამოსხმის შემთხვევაში ლითონის დანაკარგები ზოდის ზედა და ქვედა ნაწილის ჩამონატყერის სახით შეადგენს 20-25 %-ს, ხოლო უწყვეტი ჩამოსხმის შემთხვევაში ვარგისი ლითონის გამოსავალი 97 %-ს აღწევს);

2. შრომის პირობების საგრძნობი გაუმჯობესება, წარმადობის გაზრდა და მუშათა რიცხვის შემცირება;

3. ზოდის შედარებით სწრაფი გაცივების შედეგად ქიმიური და სტრუქტურული არაერთგვაროვნების საგრძნობი შემცირება;

4. მიღებული ზოდების ზედაპირის მაღალი სისუფთავე;

5. საექსპლუატაციო და კაპიტალური დანახარჯების შემცირება, რაც მომჭიმავი დგანების (ბლუმინგი, სლაბინგი) ლიკვიდაციასთანაა დაკავშირებული;

6. ჩამოსხმის პროცესის მთლიანი ავტომატიზაციისა და მექანიზაციის შესაძლებლობა. არის საამქროები, სადაც უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა პირდაპირ მიბმულია საგლინავ საამქროსთან და უწყვეტი ზოდის გლინვა და მზა პროდუქციის მიღება წარმოებს ყოველგვარი მეორადი გახურების გარეშე.

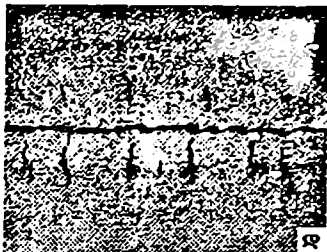
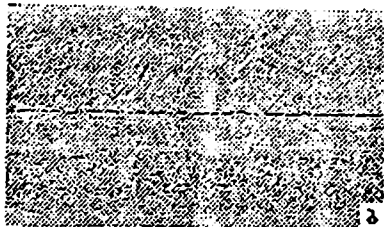
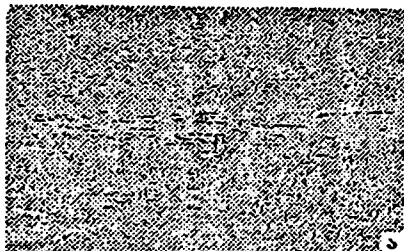
აღნიშნულმა უპირატესობებმა განაპირობა ამ მეთოდის სწრაფი გავრცელება. მთელს მსოფლიოში დღეისათვის გამოდნობილი ფოლადის 80 % უწყვეტადაა მანქანებზე ჩამოსხმული.

9.9. ფოლადის უწყვეტად ჩამოსხმული ზოდის აგებულება და დეფექტები

უწყვეტ მანქანაზე ჩამოსხმული ფოლადის ზოდი განიკვეთის სიმცირისა და სწრაფი გაცივების გამო ხასიათდება შედარებით წერილმარცვლოვანი სტრუქტურით და ნაკლები ქიმიური არაერთგვაროვნობით. ასეთი ზოდის ზედაპირიც სუფთაა და, როგორც წესი, შემდგომ გაწმენდას არ საჭიროებს.

მიუხედავად აღნიშნულისა, უწყვეტი ჩამოსხმის დროს არის ტექნოლოგიური თუ ორგანიზაციული დარღვევები, რომელთა შედეგადაც მიიღება წუნიანი ზოდი. უწყვეტი ზოდის დეფექტებიდან უნდა აღინიშნოს გარე ზედაპირული გრძივი და განივი ბადისებური ბზარები, შინაგანი ბზარები, ღერძული სიფხვიერე, უხეში წიღური ჩანართები და სხვა (სურ. 9.22). სურათზე ნაჩვენებია უწყვეტად ჩამოსხმული სხვადასხვა ზოდის გრძივი კვეთის მაკროსტრუქტურა. როგორც ვხედავთ, ყველა ზოდზე აღინიშნება ღერძული სიფხვიერე, მაგრამ თუ (ა) და (ბ) შემთხვევაში ეს სიფხვიერე ნორმალურია და შემდგომი გლინვისას შეცხოვდება, (გ) და (დ) შემთხვევაში ძალიან უხეშია და არის საშიშროება გლინვის დროს მივიღოთ წუნიანი ლითონი განშრეების სახით. ამის გარდა, ამავე ზოდებზე არის განივი ბზარები და უხეში წიღური ჩანართები.

გრძივი ბზარები ზოდზე ჯერ კიდევ კრისტალიზატორში წარმოიქმნება ქერქის გაცივების მომენტში დიდი ფეროსტატიკური წნევის გამო. ბზარი ჩნდება იქ, სადაც ქერქის სისქე მინიმალურია. ბზარების წარმოქმნას ხელს უწყობს ჩამოსხმის დიდი სიჩქარე, კრისტალიზატორის დეფორმირებული კედელი, გოგირდისა და



სურ. 9.22. უწყვეტი ზოდების გრძივი კვეთის მაკროსტრუქტურა
 ა, ბ. ზოდები ნორმალური ღერძული სიფხვიერით
 გ, დ. ზოდები დეფექტური ღერძული სიფხვიერით, განივი ბზარებით და
 უხეში წიღური ჩანართებით

სხვა მავნე მინარევების დიდი რაოდენობა ლითონში. ჩამოსხმის დიდი სიჩქარე ხელს უწყობს აგრეთვე უხეში ღერძული სიფხვიერის განვითარებას. ბზარების წარმოქმნა უფრო დამახასიათებელია ნახშირბადიანი და ლეგირებული ფოლადებისათვის.

ბზარებისა და სხვა დეფექტების თავიდან ასაცილებლად საჭიროა კარგად იქნეს გაპოხილი კრისტალიზატორის კედლები, კედლებზე არ უნდა იყოს ამონაბურცები და სხვა დეფექტები. თხევადი ლითონი კარგად უნდა იყოს დაცული მეორადი დაუანგეოსაგან. ხშირ შემთხვევაში კრისტალიზატორში სპეციალური მოწყობილობით შეჰყავთ მოდიფიკატორები, რომლებიც ხელს უწყობს კრისტალიზაციის პროცესის დანიქარებას და ჯანსაღი ზოდის მიღებას.

X ბ ა ნ ყ ო შ ი ლ ე ბ ა

ზემკლავრი ღუმელები

თ ა ვ ი 1

ფოლადის თანამედროვე წარმოება ელექტრორკალურ ღუმელებში

ნებისმიერი მეტალურგიული პროცესის განვითარებას თან ახლავს მისი დამკვიდრებისა და სხვა მსგავს პროცესებთან უპირატესობის დამამტკიცებელი მიზეზები.

ელექტრომეტალურგიის ისტორია დაახლოებით 100 წელს მოიცავს და ბოლო წლებამდე მის დანიშნულებას მხოლოდ სპეციალური თვისებების მქონე შენადნობების გამოდნობა წარმოადგენდა; ბოლო წლებში კი იგი საერთო მეტალურგიაში გაფართოვდა. ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში ამჟამად ყველა სახისა და ხარისხის ფოლადი დნება.

რატომ შეიცვალა მიდგომა ფოლადის დნობის ამ ხერხის მიმართ და აქვს თუ არა მას მომავალი? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად საჭიროა დაწვრილებით განვიხილოთ ის შემდეგი მიზეზები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ამ პროცესის არსებობაზე: 1. ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთება; 2. დნობის კონკრეტული ხერხისათვის ნედლეულის მარაგის არსებობა; 3. მისი მრავალწლიანი განვითარების პროგნოზირება; 4. ეფექტურობა; 5. პროცესის ენერგოშემცველობა; 6. ელექტრომეტალურგიაში გამოყენებული დანადგარებისა და მოწყობილობების ტექნიკური დონე და შესაძლებლობები. ისიც უნდა აღინიშნოს, რომ საკაზმე მასალების მარაგი და სახე ყოველთვის განსაზღვრავდა ფოლადის წარმოების გარკვეული პროცესების განვითარებას.

10.1.1. ელექტროფოლადსადნობი წარმოების განვითარების ტექნიკურ-ეკონომიკური საფუძვლები

ფოლადის წარმოების განვითარება ყოველთვის იყო დამოკიდებული იმ დარგების მოთხოვნათა დაკმაყოფილებაზე, რომლებ-

შიც გამოიყენებოდა ფოლადის პროდუქცია. თითოეული დარგის მოთხოვნა ფოლადის ხარისხის მიმართ მკვეთრად განსხვავდებოდა ერთმანეთისაგან (დაწყებული მძლავრე ფოლადიდან, დამთავრებული მაღალლექტრირებული ფოლადებით). სხვადასხვა თვისებებისა და ხარისხის ფოლადის გამოდნობა ერთი სახის სადნობ დანადგარში (მაგალითად, მარტენის ღუმელში ან კონვერტერში) შეუძლებელი აღმოჩნდა. სწორედ ამ მიზეზების გამო განვითარდა ფოლადის წარმოება ელექტრორკალურ ღუმელებში, რომლებშიც შეიძლებოდა ყველა სახის და ხარისხის ფოლადისა და შენადნობის მიღება; მაგრამ მათში გამოდნობილი ფოლადის ღირებულება საკმაოდ დიდი იყო და ამიტომ მათ წილად მარტო იმ მაღალლექტრირებული შენადნობის გამოდნობა მოდიოდა, რომლებიც; სხვა დანადგარებში ვერ გამოდნებოდა.

XX საუკუნის 50-იან წლებამდე ჯერ კიდევ შეიძლებოდა თერთონ მეტალურგიული პროცესების შემდგომი განვითარებისათვის უფრო ნაკლები ყურადღება მიექციათ, ვიდრე მთელი ქვეყნის წინსვლისათვის საჭირო ტექნიკურ-ეკონომიკური განვითარების პროცესებისათვის; ამის შემდეგ კი მისი უგულებელყოფა უკვე შეუძლებელი გახდა. საჭირო იყო გაცილებით უფრო მაღალი და საკონიალური თვისებების ფოლადებისა და შენადნობების შექმნა, ვიდრე მანამდე დნებოდა ამის გამო აუცილებელი გახდა ფოლადის დნობის არსებული პროცესებისა და დანადგარების შეცვლა უფრო გაუმჯობესებულით. ამიტომ ელექტროფოლადსადნობი წარმოების განვითარების გზები აღარ შეიძლება დაუკავშიროთ მარტო ცალკეული დარგების მოთხოვნებს. საჭიროა, რომ ისინი დაკავშირებული იყოს ქვეყნის ტექნიკურ-ეკონომიკურ განვითარებასა და იმ მეორადი შავი ლითონების გადაამუშავებასთან. რომლებიც დიდი რაოდენობით დაგროვდა მოწინავე ქვეყნებში და ყოველ წელს იზრდება გამოდნობილი ფოლადის პროპორციულად. გარდა ამისა, უნდა შეფასდეს ელექტროღუმელებში ყველა იმ დანიშნულების ფოლადის გამოდნობის ეკონომიკური მიზანშეწონილობა, რომელთა გამოდნობაც ხდება მარტენისა და კონვერტერულ აგრეგატებში.

მეტალურგიის განვითარებისათვის ყოფილი საბჭოთა კავშირის ხელისუფლების ბოლო გადაწყვეტილება ითვალისწინებდა 1985 წლიდან 1990 წ-მდე ფოლადის არსებული წარმოების ძირეულ შეცვლას, რაც გულისხმობდა თანამედროვე მიღწევათა წარმოებაში დანერგვას. კერძოდ, ფოლადის დნობას კონვერტერებსა (რასაკვირველია, უნაგბადის გამოყენებით და კაზში მყარი ჯვართის წილის გაზრდით) და ელექტრორკალურ ღუმელებში, მარტენის პროცესის თანდათანობით გაუქმებით.

მარტენის პროცესის განვითარებას თავის დროზე ხელი შეუწყო იმ გარემოებამ, რომ ამ ხერხით გამოდნობილი ფოლადის ხარისხი აღემატებოდა იმ დროს კონვერტერებში გამოდნობილი ფოლადის ხარისხს. ამავე დროს, შესაძლებელი გახდა მყარი ჯართის გამოყენება კაზმში (საერთოდ, რკინისა და ფოლადის თვისებამ, ხელმეორედ იქნეს გამოყენებული ფოლადის წარმოებისას. დიდად შეუწყო ხელი მარტენის პროცესის განვითარებას. თუჯთან ერთად იგი ხელმეორედ გადადნებოდა, რაც გამოათავისუფლებდა დიდი რაოდენობით ენერგეტიკულ და მატერიალურ ფასეულობას). სწორედ ფოლადის ხარისხი იყო მარტენის პროცესის განვითარების ძირითადი მიზეზი, თორემ კონვერტერებში ფოლადის დნობა ტექნიკურად და ეკონომიკურადაც გაცილებით უფრო ხელსაყრელი იყო. ამჟამად მარტენის პროცესის გამოდენამ ფოლადის წარმოებიდან (დასაყვლეთ ვეროპაში, იაპონიაში და უმრავლეს განვითარებულ ქვეყნებში მთლიანად ამოღებულია მარტენის პროცესი) შექმნა მყარი კაზმის დიდი მარაგი. საჭირო გახდა მისი გამოყენების საშუალებების ძებნა. ასეთ საშუალებად გამოჩნდა ზემძლავრი ელექტრორკალური ღუმელების გამოყენება, რომლებიც ჯართს მხოლოდ გადაადნობენ და მცირე დამუშავების შემდეგ მიიღება ჩვეულებრივი ხარისხის ანუ მარტენის ღუმელებში და კონვერტერებში გამოდნობილი ლითონის თანასწორი ფოლადი (ელექტრორკალური ღუმელების კაზმის 90–100 % მყარ ლითონურ ჯართს წარმოადგენს). რადგან ელექტროენერგია და, შესაბამისად, რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის ღირებულება მაღალია, ამიტომ თვით ღუმელის დანიშნულებას წარმოადგენს კაზმის გადნობა და თხევადი ლითონის ძირითადი დამუშავება ციკცხვებში იქნა გადატანილი. ამით მიღწეულ იქნა რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის ღირებულების დაახლოება სხვა აგრეგატებში მიღებული ლითონის ღირებულებასთან.

ამგვარი ქარხნების მშენებლობა გადაწყვედა მომხდარიყო იმ ადგილებში, სადაც თავი მოიყარა ლითონური ჯართის დიდმა მარაგმა და სადაც ხდება ფოლადის პროდუქციის დიდი რაოდენობით გამოყენება. ასეთ ადგილებად მსხვილი სამანქანათმშენებლო ქარხნები ითვლებიან. თავისი წარმოების თავისებურების გამო ისინი დიდძალ ჯართს ფლობენ და თვითონვე წარმოადგენენ მზა ლითონის მთავარ შემკვეთს. ბუნებრივია, რომ ასეთ პირობებში მომუშავე ფოლადსადნობი ქარხნის წარმადობა დიდი არ უნდა იყოს (უნდა აკმაყოფილებდეს მარტო მიმდებარე სამრეწველო უბნებს). ასე გაჩნდა „მცირე“ ანუ „მინი“ ქარხნები..

ამგვარად, ირკვევა, რომ „მცირე“ ქარხნების განვითარებისათვის ხელსაყრელი პირობები უნდა იყოს, რომლებიც გაითვალისწინებენ კონკრეტული ქვეყნის ან ადგილის საწარმოო სტრუქტურას, აგრეთვე ნედლეულით და ენერჯით მისი მომარაგების საშუალებებს. იმისათვის, რომ განესაზღვროთ, თუ როგორ წარიმართება შემდგომში ჩვენში ფოლადსადნობი წარმოების განვითარება და გარდაქმნა, რა რაოდენობის და როგორი ჯარტი შეიძლება იქნეს გამოყენებული რკალურ ღუმელებში, როგორი ხარისხის ფოლადი უნდა გამოდნს მათში, საჭიროა მიახლოებით მაინც განისაზღვროს მეორადი შავი ლითონების მარაგი.

ფოლადსადნობი წარმოებისათვის არსებობს ორი სახის ჯართი: სასაქონლო და საკუთარი. განვიხილოთ თითოეული მათგანის წარმოქმნის ძირითადი კანონზომიერებანი.

10.1.2. სასაქონლო ჯართი

სასაქონლო ჯართი ორ ნაწილად იყოფა: ამორტიზებული (დაძველებული დანადგარები და მანქანები, საყოფაცხოვრებო ჯართი და სხვა ძირითადი ფონდების ლითონური ნაწილი) და ლითონგადამამუშავებელი წარმოების ნარჩენები. საამორტიზაციო ჯართი იქმნება აგრეთვე დანადგარებისა და მანქანების მიმდინარე და კაპიტალური რემონტების შედეგად.

სასაქონლო ჯართი, რომელიც იქმნება ლითონგადამამუშავებელ წარმოებებში, 1-2 წლის შემდეგ მეტალურგიულ წარმოებას უბრუნდება. სულ სხვაა საამორტიზაციო ჯართის მობრუნების ხანგრძლივობა. იგი განისაზღვრება მანქანა-დანადგარების მუშაობის ხანგრძლივობით და სხვადასხვა ქვეყნისათვის სხვადასხვა დროით არის შემოფარგლული. მაგალითად, სსრკ-სათვის იყო 13-15 წელი, ამერიკის შეერთებული შტატებისათვის - 17-18 წელი [6,8]. განსხვავების მიზეზად ასახელებენ აშშ-ში მიმდინარე რემონტების ნაკლებ მოცულობას და შენობებში მეტი ლითონის არსებობას. რასაკვირველია, ძირითადი ფონდის მთელი ლითონური ჯართი უკან არ უბრუნდება მეტალურგიულ წარმოებას. ობიექტური თუ ორგანიზაციული მიზეზებით ჯართის ნაწილის დაბრუნება მეტალურგიულ წარმოებაში არ ხერხდება. გარდა ამისა, მანქანა-დანადგარები და ლითონური კონსტრუქციები კოროზიას და ცვეთას განიცდიან. საშუალოდ მიღებულია, რომ ეს დანაკარგები წელიწადში შეადგენს მთლიანად გამოდნობილი ფოლადის 1 %-ს. თუ იმასაც გავითვალისწინებთ, რომ საამორტიზაციო ჯართის

მობრუნების ვადა სხვადასხვა ქვეყანაში 15–25 წლით განისაზღვრება, ლითონის დანაკარგები კოროზიასა და ცვეთაზე შეადგენს 15–25 %-ს. კაპიტალისტურ ქვეყნებში ხშირად არ ხდება ჯართის შეგროვება, რადგან წარმოებებს იგი ზოგჯერ უფრო ძვირი უჯდებათ, ვიდრე ჩვეულებრივი კაზმის გამოყენება [7]. მაგალითად, შეუგროვებელი ჯართის რაოდენობა ინგლისში იყო 25 %, საფრანგეთში – 28 %, აშშ-ში – 40–45 % [7], სსრკ-ში – 20 % [8]. ეს გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ ჯართის შეგროვება კერძო პირის მიერ არის ორგანიზებული და მასზე მტკიცე ფასებია დაწესებული. თუ გავითვალისწინებთ ლითონის დანაკარგებს, გამოწვეულს ჯართის შეუგროვებლობით, კოროზიით, ცვეთით, იგი საფრანგეთში, ინგლისსა და აშშ-ში იყო 40–60 % [9]. სსრკ-ში კი – 40 %-ზე ნაკლები.

ერთი შეხედვით, ლითონგადამამუშავებელი საწარმოებიდან ჯართის მობრუნებისას დანაკარგები არ უნდა იყოს. მაგრამ ეს ასე არ არის, რადგან ლითონის დამუშავება ყოველთვის არ ხდება მსხვილ საწარმოებში. წერილი საწარმოები კი ყოველთვის არ აბარებენ ნარჩენებს, ანდა ისე შორს არიან მეორადი შავი ლითონების დამამზადებელი ადგილებიდან, რომ მათი შემოტანა წამგებიანია. მაგალითად, 1958 წელს სსრკ-ში გამოყენებული იქნა 79.2 % მთელი გამოდნობილი ლითონის, 1975 წელს – 81.2 %. აქედან ნარჩენების სახით გამოიყენეს შესაბამისად 17,8 და 16.2 %. დანაკარგებმა შეადგინა 3,0 და 2,6 % შესაბამისად [10].

საამორტიზაციო ჯართის გამოყენების მაჩვენებლად შეიძლება გამოდგეს გამოყენებული საამორტიზაციო ჯართის შეფარდება ლითონურ ფონდთან.

[8,10]	1960	1965	1970
სსრკ	14,2/393 (3.6)	17,9/578 (3,1)	21,9/811 (2,7)
აშშ	19,6/1165 (1,7)	22,1/1313 (1,7)	26,5/1498 (1,8)
იაპონია	2,9/107 (2,7)	4,9/174 (2,8)	–

მიუხედავად იმისა, რომ აშშ-ში დიდია ლითონის ფონდი, საამორტიზაციო ჯართი ნაკლებად გამოიყენება, რაც გამოწვეულია მისი ღირებულების მერყეობით. იაპონია, რომლის ლითონური ნაწარმის ძირითადი ნაწილი ქვეყნის ფარგლებს გარეთ სადღება, უფრო მეტ ყურადღებას აქცევს საამორტიზაციო ჯართს და ამიტომ მისი შეგროვება კარგად არის ორგანიზებული.

10.1.3 საკუთარი ჯართი

მეტალურგიული წარმოების ტექნოლოგიურ პროცესებში გათვალისწინებულია ლითონის გარკვეული ნაწილის დანაკარგები (სიფონური სასხმი ბოუებში ჩასხმისას – ცენტრისა, არასრული სხმული; მონატრები საგლინავე საამქროდან; წუნი; ციცხეში ჩარჩენილი ლითონის ნაწილი და სხვ.). მართალია, უწყვეტი ჩამოსხმის განვითარებით და გამოყენებით ლითონის დანაკარგები საკმაოდ შემცირდა, მაგრამ მაინც დარჩა გარკვეული ნაწილი (განსაკუთრებით დიდია სამსხმელო წარმოებაში), რომელსაც მეტალურგიული წარმოება მთლიანად იყენებს. მაღალგანვითარებულ ქვეყნებში კაზმის 40–50 %-ს შეადგენს ლითონური ჯართი. დანარჩენს – თხევადი თუჯი, ხოლო გამოყენებული ჯართის საკმაოდ დიდ ნაწილს შეადგენს საკუთარი ჯართი.

საკუთარი ჯართის რაოდენობის შექმნა ყოფილ სსრკ-სა და მაღალგანვითარებულ ქვეყნებში საგრძობლად განსხვავდებოდა ერთმანეთისაგან. ყოფილ სსრკ-ში გამოდნობილი თუჯის გარკვეული ნაწილი მიდიოდა ჩამოსხმაზე და სხვა საწარმოების მოთხოვნათა დასაკმაყოფილებლად. მაშინ, როცა, მაგალითად, აშშ-ში იგი თითქმის მთლიანად გამოიყენება ფოლადის მისაღებად (94,1 %) (სსრკ-ში შესაბამისად 81,7 %). აშშ-ში 1 ტონა ფოლადის მისაღებად იხარჯებოდა უფრო მეტი ლითონური ჯართი (517 კგ/ტ), ვიდრე სსრკ-ში (442 კგ/ტ). ეს იმით აიხსნება, რომ აშშ-ში გლინვის შემდეგ უფრო მეტი საკუთარი ჯართი გროვდება [10,12]. ეს გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ იქ ლითონის გაგლინვა ხდება რთულ პირობებში და ამიტომ მისი დანაკარგი უფრო მეტია. ლითონური ჯართის უფრო დიდი რაოდენობით მოხმარება მარტო გლინვის პროცესების გამო არ ხდება. აშშ-ში (ევროპის განვითარებულ ქვეყნებსა და იაპონიაში კიდევ უფრო მეტად) მოელი გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობაში ძირითადი ადგილი უჭირავს კონვერტერებს, რომლის კაზმში მყარი ჯართის წილი დაბალია მარტენის ღუმელების კაზმთან შედარებით. ხოლო მარტენის წარმოებას ძალიან მცირე ნაწილი უკავია ფოლადის საერთო წარმოებაში. სსრკ-ში კი პირიქით მოხდა. უანგბად-კონვერტერული დნობით მარტენის პროცესი არ შეცვლილა. II მსოფლიო ომის შემდეგ სსრკ-თვის სასწრაფოდ მოხდა საჭირო ფოლადის წარმოების გაფართოება. ვინაიდან ტექნიკურად მარტენის წარმოების განვითარება უფრო ადვილია კონვერტერულთან შედარებით. ამიტომ სწრაფი ტემპით მიმდინარეობდა მარტენის ახალი ღუმელების მშენებლობა და ძველების რეკონსტრუქცია. აშშ-ს მდგომარეო-

ბა ამ მხრივ სულ სხვანაირი იყო. მსოფლიო ბაზარზე თავისი საქონლის გასაღებისათვის მას უნდა შეექმნა უფრო იაფი და ხარისხიანი ლითონი, წინააღმდეგ შემთხვევაში გფრ-ს ბაზრებს იაპონიის საქონელი დაიპყრობდა თავისი ლითონით. კონვერტერული პროცესის განვითარებამ კი შექმნა ლითონური ჯართის ტარბი მარაგი (მარტენის პროცესისათვის, სულ მცირე, ორჯერ მეტი ლითონური ჯართია საჭირო). რამაც თავის მხრივ გასაქანი მისცა ელექტრომეტალურგიას (ომის შემდეგ აშშ-ში მხოლოდ ერთი მარტენის ღუმელი აშენდა). რადგან სსრკ-ში მეტალურგიის დარგი წავიდა მარტენის წარმოების განვითარების გზით, ბუნებრივია, რომ მყარი ჯართის გამოყენების მანევრებელი უფრო დიდი უნდა ყოფილიყო. მართლაც, მარტენის პროცესისათვის გამოიყენებოდა ჯართის 75 %, კონვერტერებისათვის – 15 % და ელექტრომეტალურგიაში – 10 % (მარტოოდენ მაღალლევირებული და სპეციალური დანიშნულების ფოლადის გამოსადნობად); ამავე პერიოდისათვის* აშშ-ში შესაბამისად 25,1; 35,0 და 39,9 % (ამასთან, რკალურ ღუმელებში დნებოდა ყველა ხარისხის ფოლადი) ანუ აშშ-ში უფრო მეტი საკუთარი ჯართი გამოიყენებოდა 1 ტ ფოლადის მისაღებად (294 კგ/ტ), ვიდრე სსრკ-ში – 228 კგ/ტ. ამის მიზეზი ადრე იყო აღნიშნული: საგლინავი წარმოების ნარჩენები, რთული პროფილისა და თხელი ფურცლის გლინვის გამო, გაცილებით მეტი იყო.

ამჟამად, როცა ლითონის უწყვეტი ჩამოსხმა ფართოდ დაინერგა საზღვარგარეთის ქვეყნებში (იაპონიაში 82 %-ზე მეტი, გფრ-ში 76 %), საკუთარი ჯართის წილი 1 ტ ფოლადის გამოსადნობად საგრძნობლად შემცირდა.

10.1.4 ელექტროფოლადის წარმოების მოცულობის პროგნოზირება

თითქმის მთელი საუკუნის განმავლობაში, როცა ფოლადის გამოსადნობ ძირითად დანადგარს მარტენის ღუმელი წარმოადგენდა, დამყარებული იყო წონასწორობა წარმოქმნილ ჯართსა და გამოსადნობი ფოლადის რაოდენობას შორის.

ჟანგბად-კონვერტერულმა პროცესმა, რომელმაც განვითარებულ და უმრავლეს განვითარებად ქვეყნებში თითქმის მთლიანად გამოდევნა მარტენის წარმოება, დაარღვია კავშირი ლითონის

* შედარება მოყვანილია 1974 წლისათვის.

ჯართისა და გამოსადნობი ფოლადის რაოდენობას შორის. იწყო დაგროვება ჯართის დიდმა მარაგმა. ამ გარემოებამ გამოიწვია მეტალურგიული გადამუშავების სტრუქტურის შეცვლა: საჭირო გახდა ჯართში განიეთებული დიდი რაოდენობის ენერჯის ხელმეორედ გამოყენება. თუ როგორ განვითარდება მომავალში მეტალურგიული წარმოება, ამის შესახებ გამოთქმულია მრავალი მოსაზრება. ასეთი მოსაზრებების გამოთქმა განსაკუთრებით გახშირდა XX საუკუნის 60-იანი წლების დასასრულისათვის, როცა ელექტრომეტალურგიის დანიშნულებაზე მკვეთრად შეიცვალა აზრი.

1971 წელს სსრკ-ში [11,12] ჩატარებულმა გამოკვლევებმა შემდეგი სურათი წარმოგვიდგინეს: თუ გავითვალისწინებთ, რომ 1 ტ ფოლადის მისაღებად იხარჯებოდა 450 კვ-მდე ლითონის ჯართი, ხოლო მარტენის პროცესი 2000 წლისათვის აღარ უნდა ყოფილიყო, მაშინ ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში გამოდნებოდა მთელი გამოსადნობი ფოლადის 20–22 % და ნახშირბადიანი ფოლადების ღირებულება გაუტოლდებოდა ჟანგბად-კონვერტერულ დანადგარებში გამოდნობილი ფოლადების ღირებულებას.

1972 წელს დასავლეთ გერმანიაში ჩატარებული მსგავსი კვლევითი სამუშაოები უფრო ფართოდ ეხებოდა ელექტრომეტალურგიის განვითარების საკითხებს. ამ ნაშრომში გათვალისწინებული იყო საამორტიზაციო ჯართის მნიშვნელობა ფოლადის წარმოებაში. თუ 1 ტ ფოლადის მისაღებად მსოფლიოში საშუალოდ იხარჯებოდა 433 კვ ლითონური ჯართი, მაშინ 1990 წლისათვის ელექტროფოლადის წარმოების მოცულობა მთლიანად გამოდნობილ ფოლადის რაოდენობაში უნდა ყოფილიყო 17,6 %, ხოლო მარტენის ფოლადისა. – 16 % (ეს მაჩვენებლები უკვე მიღწეულია). ამავე ავტორის მონაცემებით. თუ 1970 წელს საამორტიზაციო ჯართის წილი 40 %-ს შეადგენდა, 1980, 1990 და 2000 წლებისათვის იგი უნდა გაზრდილიყო 45, 50, და 55 %-მდე შესაბამისად.

ამავე ხნის აშშ-ს საპროგნოზო მონაცემებით 2000 წლისათვის გამოდნობილი ელექტროფოლადის მოცულობა მსოფლიოში იქნებოდა 46 % (აშშ-ში – 41 %) მთლიანად გამოდნობილი 1260 მლნ ტ ფოლადიდან, ხოლო ლითონის ჯართის ნაკლებობა ანაზღაურებული იქნებოდა ლითონური გუნდებით.

მაშინდელ გფრ-ში გამოითქვა სხვა მოსაზრებაც [9]: თუ 1972 წელს ამ ქვეყანაში იხარჯებოდა 460 კვ/ტ ჯართი, მაშინ, საექსპორტო ლითონის გათვალისწინებით, გამოდნობილი ელექტროფოლადის მოცულობა იქნებოდა 20 %-მდე, ხოლო დანარჩენი ფოლადი კონვერტერებში გამოდნებოდა. აქვე გამოთქმული იყო

მოსაზრება, რომ საკუთარი ჯართის რაოდენობის შემცირების შედეგად (280 კვ/ტ-დან 200 კვ/ტ-მდე, რაც გამოწვეული იქნებოდა მთელი გამოდნობილი ფოლადის 75 %-ის უწყვეტი ჩამოსხმის გამო). შეიძლება ჯართის მარაგი გაზრდილიყო 600 კვ/ტ-მდე. ამ შემთხვევაში იმ დაშვებით, რომ კონვერტირებში 1 ტ ფოლადის მისაღებად გამოიყენებდნენ 300 კვ მყარ ჯართს, ელექტრო-ფოლადის წარმოება მიაღწევდა 40 %-ს.

შავი მეტალურგიის განვითარების საერთაშორისო ცენტრის გრძელვადიანი პროგნოზით [13] 2000 წლისათვის გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა მიაღწევდა 1700–1900 მლნ ტ-ს. ამასთან, მეტალიზებული რკინის მადნისა და ატომური ენერგეტიკის განვითარების საშუალებით ელექტროფოლადის წარმოება გაიზრდებოდა 20 %-მდე 1985 წლისათვის, ხოლო 2000 წელს მიაღწევდა 38 %-ს, მარტენის წარმოება შესაბამისად შემცირდებოდა 10-დან 2 %-მდე.

ამრიგად, როგორც ზემოთ მოყვანილი მაგალითებიდან ჩანს, ერთნაირი აზრი ელექტროფოლადსა და რკინის ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის საპროგნოზო რაოდენობაზე არ არსებობდა. იგი იცვლებოდა 20 %-დან 40 %-მდე 2000 წლისათვის. ერთი გარემოება კი ყველგან გამოიკვეთა: 2000 წლისათვის მოლიანად გამოვიდოდა ხმარებიდან ან მინიმუმამდე შემცირდებოდა მარტენის ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა, ხოლო ელექტროფოლადსა და რკინის ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადების რაოდენობა გაიზრდებოდა სულ მცირე 2-ჯერ მაინც.

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოთ მოყვანილი პროგნოზები გამოთქმული იყო უმთავრესად 60–70-იან წლებში, ე.ი. მაშინ, როცა მსოფლიოს კაპიტალისტურ ქვეყნებში მეტალურგიის განვითარების საოცრად სწრაფი წინსვლა შეიმჩნეოდა; 1977 წლიდან კი იწყება კრიზისი. მოახდინა თუ არა ამ გარემოებამ გავლენა პროგნოზირებაზე?

კრიზისულ მდგომარეობას ფოლადის წარმოებაში გავლენა უნდა მოეხდინა უმთავრესად გამოდნობილი ფოლადის საერთო მოცულობაზე და არა მისი განვითარების გზებზე. მაგალითად, [14] 1985 წლის პირველ ნახევარამდე, ავტორების აზრით, ფოლადის წარმოებას კაპიტალისტურ ქვეყნებში უნდა მიეღწია 218,3 მლნ ტ-ისათვის, რაც 4 %-ით ნაკლები იქნებოდა, ვიდრე 1984 წლის პირველ ნახევარში. ელოდებოდნენ, რომ 1984–1989 წლებში ფოლადის გამოსადნობი სიმძლავრეები გაიზრდებოდა 2 მლნ ტ/წელ-ში და მეტად. 1989 წლისათვის ფოლადის წარმოება იქნებოდა 562 მლნ-ის ტოლი. ამასთან სიმძლავრეები ელექტროფოლადის გამოდნობაზე გაიზ-

რდებოდა 10,0 მლნ. ტონამდე, ხოლო ელექტროფოლადის წილი გამოდნობილი ფოლადის საერთო მოცულობაში გაიზრდებოდა 27,3 %-დან (1984 წ.) 28,8%-მდე (1989 წლისათვის).

IISI-ის 1984 წლის მე-18 კონფერენციაზე [15] გამოთქმული იყო მოსაზრება, რომ 1995 წლისათვის განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებში გამოიყენებელი ფოლადის რაოდენობა არ გაიზრდებოდა, ხოლო განვითარებად ქვეყნებში გაიზრდებოდა საშუალოდ 3 %-ით წელიწადში. გამოიყენებელი ფოლადის რაოდენობა წელიწადში მსოფლიოში გაიზრდებოდა 700 მლნ ტონიდან 1985 წელს 745 მლნ ტონამდე 1995 წლისათვის. 1990 წლისათვის კაპიტალისტურ ქვეყნებში ჭარბად იქნებოდა ფოლადსადნობი სიმძლავრეები. 1973–1983 წლებში ყოველი 100 ტ-დან მიღებული მზა პროდუქციის რაოდენობა გაიზარდა იაპონიაში 8 ტ-ით, აშშ-სა და დასავლეთ ევროპაში 5 ტ-ით. ეს ძირითადად გამოიწვია უწყვეტი ჩამოსხმის განვითარებამ და ლითონის ხარისხის გაუმჯობესებამ. ამრიგად, ფოლადის გამოდნობის რაოდენობის შემცირება, მასზე მოთხოვნების დაკმაყოფილებით, შესაძლებელია ლითონის ხარისხის გაუმჯობესებით და უწყვეტი ჩამოსხმის განვითარებით.

მეტალურგიული მრეწველობის განვითარება დამოკიდებულია კონკრეტული რეგიონის ან სახელმწიფოს სტრუქტურაზე. ნედლეულის ბაზებზე, საერთო ტექნიკურ დონეზე. ამიტომ გააკეთებელი პროგნოზები მთელს მსოფლიოში შავი მეტალურგიის განვითარებაზე ხშირად არ ემთხვევა კერძოდ აღებულ ქვეყანაში მის განვითარებას და ხანდახან საპირისპიროც არის. მაგალითად, [16]-ში აღნიშნული იყო, რომ შავი მეტალურგიის მდგომარეობა ხასიათდებოდა ერთის მხრივ წარმოების შემდგომი ზრდით. ყოფილ სსრკ-სა და ეკონომიკური ურთიერთდახმარების საბჭოს ქვეყნებში, ხოლო მეორეს მხრივ გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობის შემცირებით ევროპის ეკონომიკური საბჭოს ქვეყნებში 1,8 %-ით. მიუხედავად იმისა, რომ გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებში მცირდებოდა, რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა იზრდებოდა (მაგ., იმ დროისათვის იაპონიაში კონვერტერებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა შემცირდა 4,8 %-ით, ხოლო რკალურ ღუმელებში გამოდნობილისა კი გაიზარდა 4,3 %-ით). 1983 წელს გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობამ შეადგინა (მლნ ტ) ყოფილ სსრკ-ში – 152,5; იაპონიაში – 97,2; აშშ-ში – 75,6; ჩინეთში – 39,9; გფრ-ში – 35,7; იტალიაში – 21,8; საფრანგეთში – 17,6; პოლონეთში – 16,4; ჩეხოსლოვაკიასა და დიდ ბრიტანეთში – 15; საერთო რაოდენობამ შეადგინა 662,6 მლნ ტ (1982 წელს 645,2). საინტერე-

სოა, რომ ამ წელს უწყვეტად ჩამოიხა შემდეგი რაოდენობის ფოლადი სახელმწიფოების მიხედვით (%): იაპონია – 86,3; აშშ – 31,2; გერ – 71,8; იტალია – 68,2; საფრანგეთი – 63,8; პოლონეთი – 3,7; ჩეხოსლოვაკია – 5,1; დიდი ბრიტანეთი – 46,6.

IISI-ის მე-19 კონფერენციაზე შავი მეტალურგიის განვითარების პროგნოზები თითქმის იგივე დარჩა. 1985, 1986, 1990, 1995 წლებში მსოფლიოში გამოყენებული ფოლადის რაოდენობა (მლნ ტ) იქნებოდა შესაბამისად 719; 718,1; 720; 750.

საპროგნოზო მონაცემებით [17] XX საუკუნის 80-იან წლებში წარმოების ზრდის ტემპი 0,6 % უნდა ყოფილიყო (წინააღმდეგ 2,2 %-სა 70-იან წლებში). ელექტროფოლადის წარმოება ამ პერიოდში გაორმაგდებოდა და ათასწლეულის ბოლოს მიაღწევდა 192 მლნ ტ-ს, ანუ მთელი გამოდნობილი ფოლადის 26 %-ს. 1985 წელს რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი იქნა 170 მლნ ტ ელექტროფოლადი.

საინტერესო მოსაზრებები იქნა გამოთქმული [18] IISI-ის მე-19 კონფერენციაზე. 1985 წელს გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობამ შეადგინა 718 მლნ ტ, 1986 წელს მოსალოდნელი იყო 719 მლნ ტ, 1990 წელს – 730 მლნ ტ, 1995 წელს – 730 მლნ ტ, განსაკუთრებით გაესვა ხაზი „მცირე“ (მინი) ქარხნების სიმძლავრეების გაზრდას მსოფლიოში 30 მლნ ტონიდან (70-იან წლებში) 100 მლნ ტონამდე.

ამრიგად, 60–70-იან წლებში გამოთქმული მოსაზრებები შავი მეტალურგიის განვითარების პროგნოზირების შესახებ, შეიძლება ითქვას, მთლიანად გამართლდა. შეიძლება ცალკეული ავტორები შეცდნენ საერთო გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობაში, მაგრამ ის, რომ უპირატესი განვითარება მიეცემათ კონვერტერულ და ელექტროფოლადებს, პრაქტიკით დადასტურდა.

უკანასკნელ წლებში მართლაც დიდად გაიზარდა ელექტროფოლადსადნობი წარმოება განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებში. 1970 წელთან შედარებით მისი წილი გამოდნობილი ფოლადის საერთო რაოდენობაში გაიზარდა თითქმის ორჯერ. მისი განვითარების ზოგიერთი მთავარი მიზეზი შემდეგია [19]: 1. შედარებით დაბალი ფასები ლითონურ ჯართზე ბოლო 20–30 წლის განმავლობაში (თუმცა მასზე ფასები ირყევა დიდ ზღვრებში, რაც გარკვეულ წინააღმდეგობას ქმნის). 2. შედარებით მცირე ენერგიის მოხმარება, რადგან გარკვეული ნაწილი ენერგიისა უკვე ჯართშია განივთებული (რკინის მადნის გადამუშავება თუჯად მოითხოვს იმდენსავე ენერგიას, რამდენსაც მოითხოვს თუჯის გადამუშავება ფოლადად). 3. ელექტროფოლადსადნობ წარმოებაში გაცილებით უფრო მაღალია შრომის ნაყოფიერების ზრდის სიჩქარე, ვიდრე

სხვა რომელიმე პროცესისას. 4. რკალური ღუმელების კონსტრუქციების სრულყოფა. 5. ციციხეში თხევადი ლითონის დამუშავების განვითარებამ საგრძნობლად შეამცირა ფოლადის გამოდნობაზე დახარჯული ელექტროენერგია. ეს ორი პროცესი, ჟანგბად-კონვერტერული და ელექტროფოლადსადნობი, უფრო ნაკლები ენერგეტიკული და ეკონომიკური დანახარჯებით, ტექნოლოგიური პროცესების და დანადგარ-ხელსაწყოების გაუმჯობესებით გაცილებით უფრო წინ დგას, ვიდრე მარტენის პროცესი. რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობამ მსოფლიოში 1984 წელს პირველად გადააჭარბა მარტენის ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობას (ასეთი სურათი უფრო ადრე შეიძლებოდა გეგმონოდა, რომ სსრკ და სოციალისტური ქვეყნები, განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებთან ერთად, თავის დროზე გადასულიყვნენ შავი მეტალურგიის განვითარების პროგრესულ მიმართულებებზე) და მიაღწია 165 მლნ ტ-ს. ლითონურ კაზმსა და მეტალიზებულ ნედლეულზე მოთხოვნამ შეადგინა 351 მლნ ტ-ს [20], სასაქონლო ჯართის მიწოდებამ მიაღწია 208 მლნ ტ. 1985 წელს, მიუხედავად იმისა, რომ შეიმჩნეოდა საერთო ვარდნა მეტალურგიულ წარმოებაში, ელექტროფოლადის წარმოება განაგრძობდა ზრდას და მიაღწია 170 მლნ ტ-ს. სასაქონლო ჯართის რაოდენობა, მართალია, არ გაზრდილა, მაგრამ გაიზარდა მეტალიზებული ნედლეულის წარმოება ~12 მლნ ტ-მდე. პროგნოზით 1990 წელს ფოლადის გამოდნობის საშუალო ნაზრდი უნდა ყოფილიყო 1,2 % და მიაღწევდა 735 მლნ ტ-ს, სადაც 195 მლნ ტ იქნებოდა ელექტროფოლადი (26 %).

10.1.5. ელექტროფოლადსადნობი წარმოების ეფექტურობა

ყოფილ სსრკ-ს მრავალწლიან ენერგეტიკულ პროგრამაში 1985 წელს განსაკუთრებული ადგილი ეკირა ტექნოლოგიის სრულყოფას, ახალი ტექნოლოგიური პროცესების განვითარებას, ლითონის წარმოებაში სტრუქტურულ ცვლილებებს [21]. ფოლადის წარმოებაში ეს იყო გამოდნობილი ფოლადის წილის გაზრდა ჟანგბად-კონვერტერულ და რკალურ ღუმელებში, ლითონის ქვიდოდან გაქრვის გამოყენება, უწყვეტი ჩამოსხმის განვითარება. მარტენის ღუმელების გამოყვანა წარმოებიდან. ლითონური კაზმის გახურება გამომავალი აირებით.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში თავდაპირველად დნებოდა სპეციალური დანიშნულებისა

და მაღალღეგირებუელი ფოლადები, ანუ ისეთები, რომელთა გამოდნობა სხვა სადნობ აგრეგატებში არ ხერხდებოდა. რასაკვირველია, ასეთი ფოლადების მაღალი ღირებულება ფარავდა მათ გამოდნობაზე გაწეულ ხარჯებს. ნახშირბადიანი და დაბალღეგირებული ფოლადების წარმოება კი ასეთ ღუმელებში, ბუნებრივია, საგრძნობლად წამგებიანი იყო.

ელექტრორკალური ღუმელების წარმადობის გაზრდით მათში გამოდნარი იგივე ფოლადები ღირებულებით ჯერ გაუტოლდა მარტენისას, ხოლო შემდგომში კი, ახალი ტექნოლოგიური პროცესების და აგრეგატ-ხელსაწყოების გაუმჯობესების შედეგად, კონვერტერისასაც.

იმისათვის, რომ დაეადგინოთ, მომგებიანია თუ არა ელექტროფოლადსადნობი წარმოება, საჭიროა გავერკვეთ ელექტროღუმელში გამოდნობილი ჩვეულებრივი ხარისხის ფოლადის თვითღირებულებაში და შევადაროთ სხვა სადნობ აგრეგატებში გამოდნობილ იმავე ხარისხისა და დანიშნულების ფოლადების თვითღირებულებას იმ ქვეყნების მაგალითებზე, რომლებიც უფრო ადრე გადავიდნენ ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში ჩვეულებრივი ხარისხის (ანუ, როგორც ხშირად ამბობენ, ნახშირბადიანი) ფოლადის გამოდნობაზე. უნდა გვახსოვდეს, რომ საბაზრო ეკონომიკის პირობებში საკუთარი პროდუქციის თვითღირებულებას განსაზღვრავს კერძო ფირმა. იგი არ ითვალისწინებს სხვა ფირმების მიერ გაწეულ დანახარჯებს, ამიტომ პროდუქციის თვითღირებულება მერყევია და იცვლება იმის მიხედვით, თუ რა მდგომარეობაშია მოცემული დროისათვის ჩვენთვის საინტერესო წარმოების დონე. მაგალითად, 1974 წლისათვის აშშ-ს მეტალურგიული სიმძლავრეები თითქმის მთლიანად იყო დატვირთული და ამის გამო ფასები თუჯზე, საამორტიზაციო ჯართზე, აგლუმერატზე, მადანზე და სხვა მასალებზე მაღალი იყო. 1977-78 წლებში იმავე მასალების ფასი საგრძნობლად დაეკარდა, რადგან მეტალურგიული წარმოების სიმძლავრეები ნახევრად იყო დატვირთული. ამისდა მიხედვით მეტალურგიული პროდუქტების თვითღირებულება უშუალოდ მეტალურგიულ ქარხნებში მკვეთრად მერყეობდა, რაც საშუალებას არ იძლევა შევადგინოთ მთელი დანახარჯები I ტ ფოლადზე მთლიანად სახელმწიფო დონისათვის და შევადაროთ ეს მონაცემები ყოფილი საბჭოთა კავშირის ცენტრალიზებული ეკონომიკის პირობებისათვის შესრულებულ გამოკვლევათა შედეგებს. ამ მხრივ უფრო ხელსაყრელი და საინტერესოა განვიხილოთ ისეთი პერიოდები, რომლებიც ახლოს დგანან ყოფილი საბჭოთა კავშირის წარმოების პირობებთან.

10.1.6. შავი ლითონების წარმოების ეკონომიკა საბაზრო პირობებში და ცენტრალიზებული მართვისას

ფოლადსადნობი წარმოების ეკონომიკა საბაზრო პირობებში. როგორც აღვნიშნეთ, ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების წარმადობის გაზრდამ მათი ტექნიკური მახასიათებლების გაუმჯობესების ხარჯზე გამოიწვია ამ ღუმელში გამოდნობლი ჩვეულებრივი ხარისხის ფოლადების ღირებულების შემცირება. თვითღირებულების შემცირებისათვის ასევე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება კაპიტალური დაბანდების ოდენობას. ბრძმელებისა და ჟანგბად-კონვერტერული საამქროების შექმნა გაცილებით უფრო მეტ კაპიტალურ დაბანდებს მოითხოვს, ვიდრე ელექტროფოლადსადნობი საამქროების მშენებლობა. გარდა ამისა, სახელმწიფოს გარკვეულ ნაწილებში ჯარტის დაგროვების გამო მიზანშეწონილი გახდა არა დიდი მეტალურგიული კომპლექსების შექმნა (>5 მლნ ტ წელიწადში), არამედ პატარა, 0,1-0,5 მლნ ტ-მდე წლიური წარმადობის ე.წ. „მცირე“ (მინი) ქარხნების მშენებლობა. ეს ქარხნები არ მოითხოვენ ბრძმედის მშენებლობას, ხოლო 100% მყარ ჯართზე მუშაობისათვის ყველაზე მოსახერხებელია ზემოქალიერი ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების გამოყენება.

მაგალითისათვის ავიღოთ გფრ-ში ელექტროფოლადების თვითღირებულების 1972 წელს გამოქვეყნებული ანგარიში [9], რომელშიც გამოყენებულია ამ დროისათვის მოქმედი ფასები ყველა მასალაზე. შედარებისათვის აღებულია ორი ქარხანა 5 მლნ ტ ფოლადის წარმოებით წელიწადში (ჟანგბად-კონვერტერული საამქრო 300 ტ ტევადობის 3 კონვერტერით) და ელექტროფოლადსადნობი საამქრო 145-დან 300 ტ-მდე ტევადობის 7-10 ღუმელით. იმ დროისათვის საკუთარი ჯართის ღირებულება ტოლი იყო გადასამუშავებელი თუჯის ღირებულებისა, ხოლო სასაქონლო ჯართის ფასი გადასამუშავებელი ჯართის 75%-ს შეადგენდა. კუთრი კაპიტალური დაბანდები იანგარიშებოდა მარტო ფოლადსადნობი საამქროებისათვის, სხვა დაკავშირებული კომპლექსების გაუთვალისწინებლად: ჟანგბად-კონვერტერული საამქროსათვის 749 მარკა 1 ტ ვარგის ფოლადზე, ელექტროფოლადსადნობი საამქროსათვის - 51 მარკა.

ჩატარებული იყო აგრეთვე შედარებით გამარტივებული გამოკვლევები [22]. აქაც შედარებული იყო ჟანგბად-კონვერტერული და ელექტროფოლადსადნობი საამქროების ეკონომიკა. ანგარიში

მიდიოდა ამ საამქროებში გამოდნობილი ვარგისი ფოლადის გამოსავლის და ლითონური კაზმის საერთო ღირებულების გათვალისწინებით. გამოირკვა, რომ თუ ლითონური კაზმის საერთო ღირებულებას ავიღებთ 8,6 %-ით ნაკლებს, ვიდრე თუჯის ღირებულებას, მაშინ ელექტროფოლადსადნობ საამქროს საგრძნობი უპირატესობა ექნება (~15 %).

ზემოთ მოყვანილ გაანგარიშებებს თავისი მნიშვნელოვანი ნაკლოვანებანი გააჩნია. ამ გაანგარიშებებში გათვალისწინებული იყო მხოლოდ საამქროების ეკონომიკური მხარეები და მხედველობაში არ იქნა მიღებული საერთო ხარჯები, დაწყებული მადნის მოპოვებიდან, თუჯის გამოდნობასა და წარმოებაზე გაწეული მიმდინარე და კაპიტალური დანახარჯები. ამიტომ შემდგომი გამოკვლევები უფრო საფუძვლიანი იყო და მათ ატარებდა არა ცალკეული პირი, არამედ მთლიანად მეტალურგიული წარმოება. ასეთი სამუშაო [23] გამოქვეყნდა იაპონიაში 1974 წელს, იგი ითვალისწინებდა ერთ-ერთი ფირმის ფაქტიურ დანახარჯებს და იმ დროისათვის არსებულ ფასებს ლითონურ ჯართსა და კოქსზე. კაპიტალური დანახარჯები გათვალისწინებული იყო ე.წ. მუდმივ ხარჯებში, რომლებშიც შედიოდა აგრეთვე საამორტიზაციო დანახარჯები (10 %), პროცენტები ავანსირებული მუდმივი კაპიტალიდან (9 %) და მოგება (5 %).

შედარებისათვის აღებული იყო ჟანგბად-კონვერტერული საამქრო 200 ტ ტევადობის ორი კონვერტერით და ელექტროფოლადსადნობი საამქრო 200 ტ ტევადობის 4 ღუმელით (შედარებისათვის უნდა ითქვას, რომ ამჟამად მოქმედი ზემოქალიერი ღუმელები მეტი წარმადობისაა). ტრანსფორმატორის სრული სიმძლავრეა 75 მგვ. განსხვავებული საამქროების ეკონომიკური მაჩვენებლების შედარებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გამომუშავებული პროდუქციის რაოდენობას. ამ გამოკვლევის უპირატესობა სწორედ ისაა, რომ ორივე საამქროს წარმადობა წელიწადში 2,0 მლნ ტ ფოლადს შეადგენდა. საამქროების მშენებლობის ვადა იყო 6 წელს. ამ დროის განმავლობაში ჟანგბად-კონვერტერულ საამქროში მიღებულ ყოველ 1 ტ ლითონზე დაიხარჯა 21,8 ათასი იენი, ელექტროფოლადსადნობ საამქროში — 10,3 ათასი იენი, ანუ თითქმის ორჯერ ნაკლები. მუდმივმა ხარჯებმა შესაბამისად შეადგინა 5230 და 2470 იენი. 1 ტ თუჯის მიღებაზე დახარჯული თანხა შეადგენდა 17,5 ათას იენს, ხოლო 1 ტ ლითონური ჯართის ფასი — 15,0 ათას იენს. ვარგისი სხმულების გამოსავალი ჟანგბად-კონვერტერული საამქროდან უდრიდა 91 %-ს, ელექტროფოლადსადნობი საამქროდან — 94 %-ს.

თითოეული ფოლადისათვის გამოყვანილი კალკულაციებით მიიღეს 1 ტ კონვერტერული ფოლადის თვითღირებულება 28 135 იენი, ელექტროფოლადისა – 26295 იენი (ე.ი. რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი 1 ტ ფოლადის თვითღირებულება 1840 იენით ნაკლები). ამ მონაცემების მუდმივობას ხელს უშლის ბაზარზე ჯართის ფასების მერყეობა. მოცემული პერიოდისათვის ჯართის ფასი საკმაოდ მაღალი იყო 1979 წლიდან კი მისმა ფასმა საგრძნობლად დაიკლო. ეს ანგარიში რომ უფრო სრულყოფილი ყოფილიყო, ავტორებმა იგი აწარმოეს ჯართის სხვადასხვა ღირებულებაზე (თუჯის ღირებულება ჯართთან შედარებით გაცილებით მყარია): 13,15 და 17,0 ათასი იენი ტონაზე. ბუნებრივია, რომ პირველ შემთხვევაში სხვაობა კიდევ უფრო გაიზარდა ელექტროფოლადის სასარგებლოდ, ხოლო მეორე შემთხვევაში პირიქით მოხდა. თუმცა გასათვალისწინებელია, რომ ამ შემთხვევაში ჯართის ღირებულება თუჯის ღირებულებაზე მეტი იყო.

ანალოგიური გამოთვლებით [26] ერთმანეთს შეადარეს სხვადასხვა წარმადობის ორი საამქრო: ჟანგბად-კონვერტერული – 3 მლნ ტ წარმადობით წელიწადში და ელექტროფოლადსადნობი – 1 მლნ ტ წარმადობით წელიწადში. კალკულაციით 1 ტ თუჯის ღირებულება შეადგენდა 109,4 დოლარს, 1 ტ კოქსისა – 90 დოლარს. ფასები ლითონურ ჯართზე, ელექტროენერგიაზე, რკინის მადნის ნედლეულსა და სხვა მასალებზე აღებულ იქნა 1977 წლის პირველი კვარტალის მიხედვით. თუმცა აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ იმ პერიოდში აშშ-ში შავი მეტალურგია ღრმა კრიზისში იყო. ტექნოლოგიური ციკლისათვის „ბრძმედი – ჟანგბადის კონვერტერი“ კუთრი კაპიტალდაბანდება (წლიური წარმადობისათვის). შეფასებული იყო 344 დოლ/ტ-ით. მასში შედიოდა აგრეთვე დანახარჯები ბრძმედისათვის მადნის კონცენტრატის დაგუნდავებაზე, დაკოქსებაზე, ბრძმედისა და ფოლადის დნობის წარმოებაზე. ელექტროფოლადსადნობი საამქროსათვის იგივე დანახარჯები შეადგენდა 90 დოლ/ტ, ანუ თითქმის 4-ჯერ ნაკლებს (თუმცა ამ ანგარიშებში არ იგულისხმებოდა საელექტროდო საამქროს ხარჯები, რომლებიც საკმაოდ დიდ თანხას შეადგენდა, მაგრამ არა იმდენს, რომ შეეცვალა არსებული თანაფარდობა თვითღირებულებაში). კალკულაციების შედარებით მიიღეს: ჟანგბად-კონვერტერული სასარგებლოდისათვის – 199,9 დოლ/ტ და ელექტროფოლადისათვის – 128 დოლ/ტ.

ზემოთ მოყვანილი მაგალითებიდან ჩანს, რომ ორ სხვადასხვა განვითარებულ ქვეყანაშიც კი მეტალურგიული წარმოების ეკონო-

მიკის განვითარების პერსპექტივები ერთმანეთს არ ემთხვევა. ეს განპირობებულია თითოეული ქვეყნის ეკონომიკური პირობებით და მსოფლიო ბაზრის ფასებით. ისე კი, ორივეგან ელექტროფოლადის თვითღირებულება უფრო ნაკლებია იმჟამინდელი ჟანგბად-კონვერტერული ფოლადის თვითღირებულებაზე.

თუ უპრადლებით დავაკვირდებით ფოლადის თვითღირებულების ამ ქვეყნებში ნატარებულ ანგარიშებს, შევატყობთ, რომ ელექტროფოლადის თვითღირებულების შემცირებაზე მოქმედებს არა მარტო მუდმივი ხარჯები, არამედ მასზე დიდ გავლენას ახდენს ჯართის ფასიც. მაგალითად, იაპონიაში, სადაც ჯართი მეტად მცირე რაოდენობითაა (დიდი ექსპორტის გამო), იგი ძვირია და თითქმის გადასამუშავებელი თუჯის ფასს უახლოვდება (თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ იაპონიაში თუჯიც უფრო იაფია, ვიდრე სხვა ქვეყნებში, რადგან მათი ბრძმელები მუშაობენ უახლესი ტექნიკური და ტექნოლოგიური მიღწევების გამოყენებით. ამიტომ მათში გამოდნობილი თუჯის ფასი თითქმის ჯართის ფასს უახლოვდება). ამის გამო ამ ქვეყანაში ელექტროფოლადის თვითღირებულება უფრო მცირედაა ნაკლები ჟანგბად-კონვერტერული ფოლადის თვითღირებულებაზე, ვიდრე, ეთქვათ, აშშ-ში. აშშ-ში თვითღირებულების ასეთი დიდი განსხვავება (35 %) უნდა აიხსნას იმ გარემოებით, რომ აღნიშნულ პერიოდში მეტალურგიული წარმოების კრიზისის გამო (როცა გაკეთდა ზემოთ მოყვანილი ანალიზი) ჯართის ფასი თუჯის ღირებულების თითქმის ნახევარს შეადგენდა.

ასეა თუ ისე, მოყვანილი მაგალითები თვალნათლივ მიუთითებენ იმაზე, რომ განვითარებული კაპიტალისტური ქვეყნების პირობებში ბაზრის ფასებისაგან დამოუკიდებლად ელექტრომეტალურგიულ წარმოებას თავისუფლად შეუძლია გაუწიოს კონკურენცია ჟანგბად-კონვერტერულ წარმოებას.

ფოლადსადნობი წარმოების ეკონომიკა ცენტრალისტებული მმართველობის პირობებში. ცენტრალისტებული წარმოების პირობებში ელექტროფოლადსადნობ ღუმელებში ნახშირბადიანი და დაბალლექვირებული ფოლადების გამოდნობის კვშიმარიტი სარგებლიანობის შესწავლა არ შეიძლება შემოიფარგლოს მარტო მეტალურგიული წარმოების მანყენებლებით. საჭიროა დამატებით იქნეს გათვალისწინებული რკინის მადნის, საწვავისა და სხვა მასალების მოპოვება, რკინის მადნის ნედლეულის გამდიდრება და მომსადება და სხვ. ანგარიში უნდა გაეწიოს აგრეთვე მეტალურგიულ წარმოებასთან დაკავშირებულ სხვა წარმოებებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ, შავ მეტალურგიას

შრომის საშუალებებით — საკოქსე ქვანახშირით, ბუნებრივი აირით. ელექტროენერგიით, ელექტროდებით და სხვ.

მეტალურგიული წარმოების ეკონომიკა ცენტრალიზებული მმართველობის პირობებში საკმაოდ ყვართოდ არის გაშუქებული [25—49] ნაშრომებში. კამათის შედეგები შეჯამებულია ნაშრომში [50], რომლიდანაც შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ქვეყნის მასშტაბით მეტალურგიული წარმოების სამომავლო განვითარების გეგმის შემუშავებისათვის საჭიროა ჯართის დაგროვების სწორი პროგნოზირება და მის საფუძველზე კონვერტირებისა და რკალური ღუმელების რაოდენობების ერთმანეთთან დაკავშირება. ყოლადასადნობი წარმოების პერსპექტიული სტრუქტურის დადგენისათვის საჭიროა გათვალისწინებული იქნეს ჯართის მთლიანი გადამუშავება; გათვალისწინებული უნდა იყოს არა მარტო ცალკე აღებული პროცესებისათვის, არამედ მასალების მიღებაზე გაწეული ხარჯებიც; სხვადასხვა პროცესების შედარებისას გამოირიცხული უნდა იყოს ისეთი ანგარიშების დაპირისპირება, რომლებიც ითვალისწინებენ მხოლოდ აღებული გადამუშავების ხარჯებს და არ გულისხმობენ ქვეყანაში ფოლადის წარმოების სტრუქტურას მთლიანად; პროცესების შედარებითი ენერგოტევალობა შეიძლება განისაზღვროს მხოლოდ, როგორც ფოლადსადნობი წარმოების სტრუქტურის ვარიანტების შედარებითი ენერგოტევალობა, რომლებიც განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან სხვადასხვა დანადგარებში გამოდნობილი ფოლადის წილით.

ფოლადის გამოდნობის ორი სხვადასხვა ხერხის შედარება მოყვანილია ნაშრომში [37]. ამ ნაშრომიდან ჩანს, რომ როცა ადარებენ ორ ვარიანტს, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებოდა კაპიტალდაბანდებებით და თეითლირებულებებით, კაპიტალური დანაბანდებების შედარებითი ეკონომიკური ეფექტიანობის მანვენებელს წარმოადგენდა წარმოებული დანახარჯების მინიმუმი, რომელიც განისაზღვრებოდა მაშინდელი საგეგმო კომიტეტისა და სახმშენის მიერ დამტკიცებული ტიპური მეთოდიკით და ამის საფუძველზე იმდროინდელი სამინისტროების მიერ შემუშავებული ინსტრუქციებით. თითოეულ ვარიანტზე მოყვანილი დანახარჯები წარმოადგენენ მიმდინარე ხარჯების (თეითლირებულების) C და ძირითად საწარმოო ფონდებში ჩადებული კაპიტალური დაბანდებების ჯამს, K-ს, რომლებიც დაიყვანებოდა ერთნაირ განზომილებამდე კაპიტალური დაბანდებების შედარებითი ეკონომიკური ეფექტიანობის ნორმატიული კოეფიციენტით E_f , რომელიც ტიპური მეთოდიკით არ შეიძლება ყოფილიყო 0,12-ზე ნაკლები ანუ $C+0,12K=$ მინიმუმი. განვიხილოთ ორი ვარიანტის შედარება

ნაშრომით [10]. პირველი ვარიანტი: თანამედრეე ჟანგბად-კონვერტერული საამქრო 300 ტ ტევადობის 3 კონვერტერით და მეორე ვარიანტი: ელექტროფოლადსადნობი საამქრო 1 მლნ ტ. ნახშირბადიანი და დაბალლეგირებული ფოლადის წარმადობით წელიწადში. დაკომპლექტებული 100 ტ ტევადობის ღუმელებით და მაღალი ხვედრითი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებით. ნაგულისხმევია საამქროების განლაგება ყოფილი საბჭოთა კავშირის ცენტრალურ რაიონებში. ამრიგად, იგულისხმებოდა, რომ საამქროები აღჭურვილნი იყვნენ უახლესი ტექნიკით. სხვადასხვა წარმადობის საამქროები იმიტომ იყო აღებული, რომ მიახლოებოდნენ პრაქტიკაში აღებულ სინამდვილეს; ხოლო აღებულ საამქროებში ერთი და იგივე ფოლადების გამოდნობა გამორიცხავდა განუანგვასა და ლეგირებაზე გაწეული ხარჯების გაელენას ლითონის თვითღირებულებაზე. ჟანგბად-კონვერტერული ვარიანტისათვის საჭირო თუჯის წარმოება გათვალისწინებული იყო კუზნეცკის ქვანახშირიდან მიღებულ შემოზიდულ კოქსის გამოყენებით კურსკის მაგნიტური ანომალიისა და კრივოი-როგის აგლომადნებიდან მიიღებული კონცენტრატებისა და დაფლუსებული აგლომერატისაგან. ქვეყნის ცენტრში განლაგებული ქარხნისათვის ეს პირობები უსრუნველყოფდნენ მოყვანილი დანახარჯების მინიმუმს. თუ გავითვალისწინებთ დანახარჯებს, დაწყებულს მადნის ამოღებიდან და დამთავრებულს საერთო საქარხნო დანარიცხებით, მივიღებთ, რომ ჟანგბად-კონვერტერული ქარხნის 1 ტ ლითონის თვითღირებულება შეადგენდა 37,38 მან.*, ელექტროფოლადისა – 34,0 მან., კაპიტალური დაბანდება 1 ტ წლიურ ფოლადზე პირველ შემთხვევაში 186,5 მან., მეორეში – 53,8 მან. ანგარიშისას ლითონური ჯართის ღირებულება აღებული იყო თუჯის ფასის 80 %, ანუ გარკვეული მარაგით. ჟანგბად-კონვერტერული საამქროსათვის თხევადი ფოლადის გამოსავალი შეადგენდა 90 %-ს, ელექტროფოლადსადნობი საამქროსათვის – 95 %-ს.

ამრიგად, მაშინდელ საბჭოთა კავშირში მეტალურგიის ცენტრალიზებული მმართველობის პირობებშიც ეკონომიურად გამართლებული იყო დიდი ხვედრითი სიმძლავრის ტრანსფორმატორიანი 100–150 ტ ტევადობის, ღუმელებით აღჭურვილი 0,5–1,5 მლნ ტ წლიური წარმადობის ელექტროფოლადსადნობი საამქროს მშენებლობა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ პირველ შემთხვევაში კაპიტალური დაბანდებანი 1,75-ჯერ მეტი იყო. მეტი იყო აგრეთვე კაპიტალური დაბანდების გამოსყიდვის დრო. ჯართის არსებობისას

* მან. – მანეთი (საბჭოთა კავშირის).

ელექტროფოლადსადნობი საამქროების მშენებლობა მიზანშეწონილი იყო როგორც მსხვილ მრავალსახიან მეტალურგიულ წარმოებებში, ასევე ლითონის გადაამაშუაებელ ქარხნებთან ახლოს.

10.1.7. ფოლადის წარმოების პროცესების შედარებითი ენერგოტეკადობა

როგორც ცნობილია, რომელიმე ტექნოლოგიური პროცესის განხორციელებისათვის ძალიან დიდი ყურადღება ექცევა მასზე გაწეულ ენერგიის ხარჯს. ამიტომაც ეკონომიკურ მონაცემებთან ერთად ხშირად განიხილავენ პროცესების ენერგოტეკადობასაც. მისი განსაზღვრისათვის ისევ მიემართოთ ნაშრომს [10] და გამოვიყენოთ მასში მოყვანილი გამოთვლები. ჟანგბად-კონვერტირული და ელექტროფოლადსადნობი პროცესების ენერგოტეკადობის ანალიზი ჩატარებულია ყოფილი საბჭოთა კავშირის სახალხო მეურნეობის მასშტაბით, ანუ გათვალისწინებულია დნობისათვის ნედლეულის მოსამზადებლად საჭირო ყოველგვარი ენერგიისა და სათბობის ხარჯი.

განვიხილოთ ჯერ ელექტროენერგიის ხარჯი ცალ-ცალკე ჟანგბად-კონვერტირული და ელექტროფოლადსადნობი წარმოებებისათვის. ჟანგბად-კონვერტირული პროცესის მაგალითისათვის უპირველეს უოვლისა აიღება ენერგეტიკული ხარჯები თუჯის გამოდნობისათვის, ანუ ელექტროენერგიის ხარჯი მოპოვებაზე, რკინის მადნის ნედლეულისა და კოქსის დანაჭროვნება-დამსხვრევასა და გამდიდრებაზე, დაკოქსვასა და ავლომერაციაზე, აიროვანი ჟანგბადის მიღებაზე, ელექტროფოლადსადნობ საამქროებში რკინის ჯართის გადასადნობად მომზადებაზე და ელექტროდების დასამზადებლად. ყველა ეს ხარჯი შეფასებული იყო ყოფილი საბჭოთა კავშირის მსხვილ საწარმოებში ელექტროენერგიის ფაქტიური დანახარჯების მიხედვით ანდა საპროექტო მონაცემების საფუძველზე (ელექტროენერგიის ხარჯი სასაქონლო ჯართის გადაამაშუაებებაზე განსრახ ალებულია მეტობით, ხოლო მაღალხარისხიანი ელექტროდებისათვის დახარჯული ენერგომეცულობა – საპროექტო მონაცემებით). როგორც მოსალოდნელი იყო, 1 ტ ფოლადის მისაღებად ელექტროენერგიის ხარჯი ელექტროფოლადსადნობ წარმოებაში მეტია დაახლოებით 400 კვტ.სთ/ტ-ით მიუხედავად იმისა, რომ მხედველობაში მიღებული იყო იმ ელექტროენერგიის ხარჯი, რაც იხარჯება მომიჯნავე მრეწველობაში

(ელექტროენერჯის ხარჯი 1982 წლისათვის გამოთვლების ავტორების მიერ მიღებული იყო 1 ტ ელექტროფოლადისათვის – 676 კვტ.სთ, 1 ტ ქანგბად-კონვერტერული ფოლადისათვის – 277 კვტ.სთ).

მაგრამ თუჯის მიღებისას, აგლომერაციის ჩათვლით, ელექტროენერჯის გარდა გამოიყენება მყარი და აიროვანი სათბობი. მოყვანილი პირობების გათვალისწინებით, რომ 1 ტ თუჯის მისაღებად იხარჯებოდა 18,3 გჯ (გიგაჯოული), აგლომერაციაზე – 1,1 გჯ/ტ, ბუნებრივ აირს შეაქვს – 3,93 გჯ/ტ, ამ დანახარჯებს უნდა გამოაკლდეს ბრძმედის აირის (1500 მ³/ტ) ენერჯია, რადგან გამოიყენებოდა არამეტალურგიული დანიშნულებით – 6,6 გჯ/ტ. ამრიგად, 1 ტ თუჯის მისაღებად იხარჯებოდა სათბობის 16,7 გჯ ენერჯია. 1977 წლისათვის 1 მგვტ.სთ. ენერჯიის მისაღებად საბჭოთა კავშირში იხარჯებოდა 334 ტ პირობითი სათბობი. ანუ სათბობის ენერჯიის გამოყენების კოეფიციენტი, გადათვლილი ელექტროენერჯიაზე, შეადგენდა 36,8. გასათვალისწინებელია აგრეთვე ელექტროენერჯის დანაკარგები ელექტროფოლადსადნობ საამქრომდე (~7 %) და მივიღებთ, რომ ელექტროენერჯიაში სათბობის ენერჯიიდან გადავიდოდა 34,2 %. 16,7 გჯ თბური ენერჯია ეკვივალენტია 1585 მგვტ.სთ. ელექტროენერჯისა, ხოლო მთლიანად თუჯის მიღებაზე იხარჯებოდა 1840 მგვტ.სთ. იმ კოქსის ენერჯია, რომელიც გამოიყენებოდა რკალურ ღუმელებში, ეკვივალენტურია 280 კვტ.სთ ელექტროენერჯისა. ამრიგად, 1 ტ ფოლადის მისაღებად მთლიანი ენერჯიის ხარჯია ქანგბად-კონვერტერული ფოლადისათვის 1560 კვტ.სთ, ხოლო ელექტროფოლადისათვის – 70 კვტ.სთ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ანალოგიური გამოთვლები ჩატარებული აქვთ სხვა ავტორებსაც. მაგალითად, [25] ნაშრომის მიხედვით ენერგოტევალობა, გამოხატული პირობითი სათბობის ერთეულებში, შეადგენს: 27 და 50 % ლითონური ჯართის გამოყენებით კონვერტერებში გამოდნობილი მდულარე ფოლადისათვის 0,9060 და 0,7059 შესაბამისად; მარტენის ღუმელში 50 % ჯართით გამოდნობილი განქანგული ფოლადისათვის – 0,7622; 100 % ჯართის გამოყენებით რკალურ ღუმელში გამოდნობილი იგივე ფოლადისათვის – 0,2316.

მართალია, რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ლითონის ენერგოტევალობა ამ შემთხვევაშიც თითქმის სამჯერ ნაკლებია ქანგბად-კონვერტერულ და მარტენის ღუმელებში გამოდნობილი ლითონის ენერგოტევალობაზე, მაგრამ ასეთი დიდი განსხვავება სხვა გამოკვლევებში შეიძლება არ შეგვხედეს. განსაკუთრებით იმ ქვეყნებში, სადაც სათბობის და სხვა ენერგეტიკული მასალების

ფასი მკვეთრად იცვლება სხვადასხვა მიზეზების გამო (მაგ. ენერგეტიკული კრიზისები).

ანალოგიური გამოკვლევებია ჩატარებული აშშ-შიც. მათ მიერ ელექტროენერჯის ენერგეტიკული კოეფიციენტი გამოყვანილია ელექტროსადგურებში მყარი საწვავის გამოყენების 32 %-დან (11,25 მგჯ 1 კვტ.სთ-ზე). შესაბამისი კოეფიციენტი ლითონური ჯართისადმი მიღებული იყო ნულის ტოლად. ამ გამოთვლებით 1 ტ თხევადი ფოლადის მისაღებად ელექტროფოლადსადნობი პროცესისას იხარჯება 8,2 გჯ, ჟანგბად-კონვერტერული პროცესისას – 20,06 გჯ, ანუ ~2,45-ჯერ ნაკლები. რასაკვირველია, ენერგეტიკული კოეფიციენტი ამ შემთხვევაში აღებული იყო ამ ქვეყნის წარმოების პირობებისათვის.

თ ა ვ ი II

ზემძლავრი რკალური ღუმელები

ჯერ კიდევ XIX საუკუნის 80-იან წლებში შემჩნეული იყო, რომ გამდნარი ფოლადის სასურველ ტემპერატურამდე გახურება და მისი ღუმელში დამუშავება შესაძლებელია მხოლოდ რკალურ ღუმელებში, მაგრამ ელექტროენერჯის სიძვირის, ტრანსფორმატორების მცირე სიმძლავრის, მედეგი ცეცხლგამძლე მასალების უქონლობის გამო და სხე, რკალური ღუმელების წარმოებაში გამოყენება მხოლოდ XX საუკუნის დასაწყისიდან ხდება. მათში დნებოდა მარტო მაღალხარისხოვანი და მაღალლეგირებული ფოლადები, რომელთა მიღება სხეა სადნობ აგრეგატებში ვერ ხერხდებოდა; ფოლადის გამოდნობაზე გაწეულ ხარჯებს კი ფარავდა ფოლადის ღირებულება. 20-იანი წლებისათვის, ახალი აღმოჩენების პრაქტიკაში განსახორციელებლად და სათანადო ტექნიკური მოწყობილობების შესაქმნელად, წარმოების თითქმის ყველა სფეროში საჭირო იყო ფოლადის ხარისხის მკვეთრი გაუმჯობესება. რკალური ღუმელები თავისი შესაძლებლობებით (დაჟანგვითი და აღდგენითი პერიოდების თანმიმდევრობითი გამოყენება ერთ ღუმელში) ყველაზე უნივერსალური დანადგარი აღმოჩნდა ხარისხიანი ფოლადების მისაღებად. ამ ხანებში უკვე გამოიყენებოდა ტრანსფორმატორები, რომელთა საშუალებით ხვედრითი სიმძლავრე აღწევდა 250 კვ.ა/ტ-დან 170 კვ.ა/მდე, შესაბამისად 5 და 30 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის.

შემდგომში პეიგერმა დაადგინა, რომ ღუმელი ყველაზე კარგად მაშინ მუშაობს, როცა ერთ ელექტროდზე მოდის 4 მგვ. ასეთი შეზღუდვის მიზეზი იყო მოსაზრება, თითქოს მყარი კაზმის სითბოგამტარობა ისეთია, რომ არსებობს რკალების ქვეშ ლითონის გადახურებისა და აორთქლების საშიშროება. ამიტომ 60 ტ ტევადობის ღუმელებიც იკვებებოდა 13-15 მგვ. სიმძლავრის ტრანსფორმატორებით, რაც შეადგენდა 220-240 კვ.ა/ტ ხვედრით სიმძლავრეს. XX საუკუნის 60-იან წლებამდე ასეთი ხვედრითი სიმძლავრის ღუმელები 80-100 ტ ტევადობისაც იკებოდა. ასეთი შეხედულება XX საუკუნის თითქმის 60-იან წლებამდე ბატონობდა მაღალხარისხოვანი და მაღალლეგირებული ფოლადების მისაღებად იმ დროისათვის დნობის მოქმედი ტექნოლოგიური პროცესების გამო. რადგან მათთვის არ იყო მიზანშეწონილი უფრო მძლავრი ტრანსფორმატორების გამოყენება. მიუხედავად ასეთი მოსაზრებებისა, მაინც ხდებოდა ტრანსფორმატორების სიმძლავრის მომატება, თუმცა ძალიან თავშეკავებულად. დადგინდა, რომ მომატებული სიმძლავრისას ისრდება ღუმელის წარმადობა გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობის შემცირების ხარჯზე. ტრანსფორმატორების სიმძლავრის ზრდას ხელს უშლიდა შემდეგი გარემოებები: 1. ღუმელის კედლებისა და თაღის მედეგობის მკვეთრი ვარდნა მათზე თბური დატვირთვის გაზრდის გამო; 2. რკალის ძაბვის შემცირება ღუმელის ამონაგზე გრძელი რკალის გავლენის შემცირებისათვის იწვევდა ღუმელის სიმძლავრის ვარდნას. მისი გაზრდისათვის საჭირო იყო დენის ძალის მომატება, ამას კი მივყავართ ელექტრული მ.კ.კ. და სიმძლავრის კოეფიციენტის შემცირებისაკენ. 3. მძლავრი ტრანსფორმატორების გამოყენებისას დნობის არსებული ტექნოლოგიური პროცესებისათვის (დაჟანგვითი და ადდგენითი პერიოდების გამოყენებით) მისი მთლიანი სიმძლავრე გამოიყენება მხოლოდ გადნობისას, რომელიც შეადგენს მთელი დნობის ხანგრძლივობის 40-45 %-ს. რაც უფრო მძლავრი იქნება ტრანსფორმატორი, მით უფრო არასრულყოფილად გამოიყენება იგი, მით უფრო ძვირი იქნება ყოველი 1 კვტ.სთ ელექტროენერგია და მით უფრო გაძვირდება 1 ტ ფოლადის ღირებულება.

დაახლოებით 1960 წლისათვის ელექტროფოლადსადნობი წარმოების ტექნოლოგიამ ძირეული გარდაქმნა განიცადა. დაიწყო ზოგიერთი ტიპის ფოლადსადნობი დანადგარის (თომასის კონვერტერი, მარტენის ღუმელი) გაქრობა ან რაოდენობრივი შემცირება. მათ ნაცვლად დაიწყო განვითარება ჟანგბად-კონვერტერულმა და ელექტროფოლადსადნობმა პროცესებმა. 1964 წელს შვაბეს

და რობინსონის [52] მიერ ჩამოყალიბებული იყო ე. წ. ზემძლავრი ღუმელების შექმნის და მათი გამოყენების მოსაზრებანი. 6.7 მ-ის დიამეტრის რკალურ ღუმელებზე 1959—1963 წლებში იდგა 25 მგე.ა სიმძლავრის ტრანსფორმატორი. შემდგომში ეს ტრანსფორმატორი შეიცვალა 48 მგე.ა სიმძლავრის ტრანსფორმატორით და დნობებს შუა გაცდენები შემცირდა 20—22 %-ით. ხოლო ღუმელის წარმადობა გაიზარდა დღე-ღამეში 700 ტ-დან 1000 ტ-მდე. შემდგომში ტრანსფორმატორის სიმძლავრე გაზარდეს 74—82 მგე.ა-მდე და ყოველი ღუმელის საშუალო წარმადობამ მიაღწია 1300 ტ-ს დღე-ღამეში. მათ მიერ წამოყენებული მოსაზრებებით [53] ხვედრითი სიმძლავრე უნდა ყოფილიყო 540—380 კვ.ა/ტ-ზე. მაგრამ არც ეს სიმძლავრე აღმოჩნდა ზღერული და 1980 წლისათვის მან მიღწია 600—1000 კვ.ა/ტ-ზე.

როგორც არ უნდა გამოიხატოს ხვედრითი სიმძლავრე, ის მაინც არ იძლევა ღუმელის წარმადობის ნათელ სურათს. პირველ რიგში უნდა განისაზღვროს საშუალო და მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრეების შეფარდება გადნობისას და მთელი დნობისას და დროის გამოყენების რაციონალური კოეფიციენტი (რომელიც განისაზღვრება ღუმელის გამორთულ მდგომარეობაში ყოფნის ხანგრძლივობით). ღუმელი გამორთულია ხოლმე როგორც ტექნოლოგიური პროცესის აუცილებლობით, ასევე ორგანიზაციული მიზეზებითაც. შვებეს მიხედვით მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი გამოიხატება გადნობის ან დნობის საშუალო აქტიური სიმძლავრის შეფარდებით მაქსიმალურ სიმძლავრესთან გადნობის პერიოდში (0,7). დროის გამოყენების კოეფიციენტი განისაზღვრება ღუმელის ჩართულ მდგომარეობაში ხანგრძლივობის ფარდობით დნობის ხანგრძლივობასთან. ამ კოეფიციენტების სიდიდე არ უნდა იყოს 0,7-ზე ნაკლები, მათი ნამრავლი კი — 0,5-ზე (0,7·0,7=0,49≈0,5).

10.2.1. ზემძლავრი რკალური ღუმელების ენერგეტიკული ბალანსი და ენერჯიის ხარჯი

შავი ლითონების მეტალურგია სახალხო მეურნეობის დარგებს შორის ერთ-ერთი ყველაზე დიდი ენერგომომხმარებელია. ამ დარგში გამოიყენება მთლიანად გამოშუშავებული სათბობისა და ელექტროენერჯიის ~17 %. ამიტომ ყველა სახის ტექნოლოგიური პროცესების განხილვისას აუცილებელია ყურადღება მიექცეს ენერგეტიკულ მხარეს, რადგან ენერჯიით უზრუნველყოფა

თანდათან ძნელდება და ძვირდება. ასეთი მდგომარეობა შეიძინევა მთელს მსოფლიოში. ბუნებრივია, რომ ამ საკითხებს დიდ ეურად-ლებას აქცევენ ყველა ქვეყანაში. ენერჯის წყაროდ მსოფლიოში ამჟამად ფართოდ გამოიყენება ნავთობი და ბუნებრივი აირი. მაგრამ მათი მარაგი თანდათან მცირდება და მალე შესაძლებელია მათზე მოთხოვნა უფრო მეტი იყოს, ვიდრე მოპოვებაა.

ვოლადისა და თუჯის წარმოების ენერგეტიკული შეფასება წარმოუდგენელია მსოფლიო ენერგეტიკის განვითარების გარეშე. განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებში XX საუკუნის 50-იანი წლებისთვის ენერგეტიკული რესურსებისა და ენერჯის გამოყუ-ნებისადმი მიდგომა იცვლებოდა ბაზრის თავისებურებების შესა-ბამისად. შემცირდა ნახშირის, როგორც ენერჯის წყაროს გამო-ყენება, რადგან მსოფლიოს სხვადასხვა ადგილებში მოიძებნებოდა დიდი რაოდენობის უფრო სუფთა და ადვილად მოსახმარებელი სათბობი – ნავთობი. შემდგომში მას დაემატა ბუნებრივი აირიც, რომლის მოხმარებაც დაკავშირებული იყო მხოლოდ გადატანის საშუალებებთან – ტრანსპორტთან. ამ გარემოებამ გამოიწვია მრეწველობის განვითარება ისეთ ქვეყნებშიც კი, რომელთაც არ გააჩნიათ არაერთარი ნედლეული, მაგ. იაპონია.

როგორც ნაშრომი [54] გეჩვენებს, 1978 წელს მსოფლიო მოთხოვნა ენერჯიაზე შეადგენდა 10 მილიარდ ტონა პირობით საწვავს (რაც ტოლია $81,5 \times 10^{12}$ კვტ.სთ-ისა). აქედან 44 % იყო ნავთობი, 30 % – ნახშირი, 18 % – აირი. 8 % – ატომური და პიდროენერჯია. 1990 წლისათვის, ავტორების აზრით, ნახშირსა და აირზე მოთხოვნა გაიზრდებოდა 1,8–2,0-ჯერ. ასეთი დიდი ენერჯიების გამოყენება, რასაკვირველია, აყენებდა სათბობის ეკონომიურად ხარჯვის საკითხს, რომელიც უნდა გადაწყდეს ნაკლები ენერჯის მომხმარებელი პროცესების შექმნით და დანერგვით. კერძოდ, შავ მეტალურჯიას წაყენება მკაცრი მოთხოვნები ენერჯის გამოყენების შემცირებასა და მისი გამოყენების მ.ქ.კ.-ს გაზრდაზე. მაგრამ ამ მოთხოვნებს ნაწილობრივ ეწინააღმდე-გება შავი მეტალურჯიის განვითარების შემდეგი სხვა მიმართუ-ლებები: 1. ლითონის მომხმარებლებმა უნდა შეზღუდონ გარკვეულ ზღვრებში მოთხოვნები შუა პროდუქციის ხარისხისადმი (რასაკვირ-ველია იმ შემთხვევაში, როდესაც ეს შესაძლებელია), რადგან ლითონის ხარისხის გაუმჯობესება ყოველთვის დაკავშირებულია დამატებით ენერგეტიკულ ხარჯებთან. 2. ბოლო ხანს განსაკუთ-რებული ყურადღება ეთმობა გარემოს დაცვას დაბინძურებისაგან. რისთვისაც საჭირო დანადგარები მოითხოვენ საკმაოდ დიდ ენერ-ჯიას. მაგალითად, თუ აშშ-ს შავი მეტალურჯია დააკმაყოფილებს

ყველა იმ მკაცრ მოთხოვნას, რომლებიც უზრუნველყოფენ გარემოს დაცვას დაბინძურებისაგან, საჭირო გახდება დამატებით დაიხარჯოს შავი მეტალურგიის დარგში გამოყენებული მთლიანი ენერჯის 10 %.

ენერჯის გამოყენების შექცევების ხერხების საპოვნელად დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ზემოქალიური ღუმელების როგორც ენერგეტიკული ბალანსის შედგენას, ისე ენერჯის ხარჯის განსაზღვრას და ორივეს გამოკვლევას.

ისეთი რთული და დიდი დანადგარისათვის, როგორც არის რკალური ღუმელი, ენერგეტიკული ბალანსის შედგენა მეტად ძნელი საქმეა. ყოველი რკალური ღუმელი თავისი ინდივიდუალური მანევრებლებით ხასიათდება. ამიტომ მისი განზოგადებული ენერგეტიკული ბალანსის შესადგენად საჭიროა მრავალი რკალური ღუმელის პრაქტიკული გამოკვლევა.

ენერგეტიკული ბალანსისა და ენერჯის ხარჯის განსაზღვრისათვის მრავალი თეორიული და პრაქტიკული სამუშაოა ჩატარებული. გავეცნოთ რამდენიმე მათგანს.

ზოგადად რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი [55] შედგება შემავალი და გამავალი ნაწილებისაგან.

ენერჯის შემავალ ნაწილებად ითვლება: Q_1 - სითბო, რომელიც შედის ღუმელში ელექტრული ენერჯიით; Q_2 - სითბო, რომელიც შეაქვს კაზმს; Q_3 - სითბო, რომელიც მიიღება აბაზანაში მიმდინარე ეგზოთერმული რეაქციებით; Q_4 - სითბო, რომელიც გამოიყოფა ღუმელში ელექტროდების დაჟანგვით.

ენერჯის გამავალ ნაწილებად ითვლებიან: Q_1' - ღნობის პროდუქტების (თხევად ფოლადი და წიდა) სითბო; Q_2' - სითბო, რომელსაც შთანთქავს აბაზანაში მიმდინარე ენდოთერმული რეაქციები; Q_3' - ღუმელის ყველა სახის თბური დანაკარგი; Q_4' - დანადგარის ელექტრული დანაკარგები.

საერთოდ, დანადგარების მუშაობას განსაზღვრავენ შემდეგი ენერგეტიკული მონაცემები:

$$1. \text{ თბური მ.ქ.კ. } \eta_{\text{თბ}} = \frac{Q_1' + Q_2' - Q_2}{Q_1 + Q_3 + Q_4} \cdot 100\%;$$

$$2. \text{ ელექტრული მ.ქ.კ. } \eta_{\text{ელ}} = \frac{Q_1 - Q_1'}{Q_1} \cdot 100\%;$$

3. ელექტროენერჯის ხვედრითი ხარჯი (კვტ.სთ/ტ)

$$W = \frac{Q_1}{G},$$

სადაც G ერთ დნობაზე გამოდნობილი ფოლადის მასაა.

ენერგეტიკული ბალანსის აქ ჩამოთვლილ ნაწილებში არ შედის ღუმელის ამონაგეში დაგროვილი სითბო. მიღებულია, რომ ეს სითბო მუდმივია, ე.ი. ყოველ დნობაზე ჯართს ერთი და იგივე რაოდენობის სითბო გადაეცემა. ასეთი სურათი შეიძლება იყოს დიდი ტევადობის ღუმელების შემთხვევაში, როცა შრომის ორგანიზაცია მაღალ დონეზეა და დნობებს შორის გაცდენები ყოველთვის ერთნაირია. მცირე ტევადობის ღუმელებისათვის (განსაკუთრებით საჩამოსხმო საამქროებში) კი აუცილებელია ამონაგეში დაგროვილი სითბოს რაოდენობის გათვალისწინება.

როგორ განისაზღვრება ენერგეტიკული ბალანსის შემაღენელი ნაწილები:

Q_1 – ღუმელში შეყვანილი ელექტრული ენერგია აღირიცხება მასზე დაყენებული აქტიური ენერგიის ელექტრული მრიცხველებით. თუ ღუმელზე დაყენებულია რეაქტიული ენერგიის მრიცხველიც, მაშინ შესაძლებელია ერთდროულად განისაზღვროს დანადგარის სიმძლავრის გასაშუალებული კოეფიციენტი. თუ დნობის განმავლობაში ღუმელში არ შექყავთ აიროვანი ჟანგბადი, მაშინ Q_1 შეადგენს მთლიანი შემაჯავლი სითბოს 80–90 %-ს. თუ გამოიყენება აიროვანი ჟანგბადი – 60–70 %-ს.

Q_2 – წარმოადგენს მასალების (ჯართის, მადნის, ამწიდველების, ფეროშენადნობების და სხვ.) თბოტევადობას; თუ ღუმელი მუშაობს მყარ კაზმზე, მაშინ მისი წილი საერთო სითბოს ბალანსში ძალიან მცირეა და განისაზღვრება თბოტევადობის ცხრილებიდან (რასაკვირველია, საჭიროა ღუმელში შეტანილი ყველა მასალის ზუსტი აწონვა); თუ ღუმელი მუშაობს გამდნარ კაზმზე (მარტენი, კონვერტერი), მაშინ Q_2 -ის წილი საკმაოდ დიდია.

Q_3 – ეგზოთერმული რეაქციების სითბო განისაზღვრება მხოლოდ ფიზიკურ-ქიმიური გამოთვლებით და დამოკიდებულია დნობის მატერიალურ ბალანსზე. თუ დნობისას არ გამოიყენება აიროვანი ჟანგბადი, მაშინ Q_3 შეადგენს მთელი შემაჯავლი სითბოს 8–12 %-ს; თუ გამოიყენება ჟანგბადი, მაშინ – 30–40 %-ს.

Q_4 – ელექტროდების დაჟანგვით მიღებული სითბო განისაზღვრება ელექტროდების წონითი დანაკარგების მიხედვით. ამისათვის ელექტროდებს წონიან დნობის დაწყებამდე და დამთავრების შემდეგ, ანდა ზომავენ მის დიამეტრს ამავე პერიოდში. მიღებულია, რომ I კვ გრაფიტის დაჟანგვისას გამოიყოფა დაახლოებით 33500 კჯ

ენერგია, ხოლო თუ დნობის განმავლობაში დაიჟანგება G კგ. მაშინ $Q_4 = 0,6 \cdot 33500G$. კოეფიციენტი $0,6$ გეინვენებს, რომ ელექტროდების ჟანგით მიღებული სითბო მთლიანად ღუმელში არ გამოიყოფა. ამ სითბოს წილი საერთოდ შემავალი სითბოს რაოდენობაში შეადგენს $2-4$ %-ს.

Q_1 - დნობის პროდუქტების სითბო გამოითვლება მიღებული თხევადის ლითონისა და წიდის თბოშემცველობებიდან. ამისათვის ისაზღვრება ლითონის და წიდის მასა, მათი ტემპერატურა, დანაკარგები ჩამოსხმისას და ა. შ. დნობის პროდუქტების სითბო შეადგენს მთელი დახარჯული სითბოს $50-65$ %-ს. აქედან წიდაზე მოდის მისი $7-10$ %.

Q_2 - ენდოთერმული რეაქციების სითბო განისაზღვრება ისევე, როგორც ეგზოთერმიულისა. იგი ასევე დამოკიდებულია დნობის მატერიალურ ბალანსზე. მისი წილი მთლიანად დახარჯული სითბოს რაოდენობაში შეადგენს $4-8$ %-ს.

Q_3 - ღუმელის ყველა სახის თბური დანაკარგი შეადგენს მთელი დახარჯული სითბოს $25-35$ %-ს. მას განსაზღვრავენ ცალკეული შემადგენელი ნაწილებიდან: დანაკარგები ამონაგიდან, გამაცივებელი წყლით, სამუშაო ფანჯრიდან და სხვ.

Q_4 - ელექტრული დანაკარგები გაიზომება ელექტრული ხელსაწყოებით.

ახლა გავეცნოთ კონკრეტულ მაგალითებს ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის შესწავლისათვის. [56] ნაშრომში მოყვანილია 100 ტ ტევადობის ზემძლავრი ღუმელის მატერიალური, ენერგეტიკული და ექსერგეტიკული ბალანსები, ღუმელის კონსტრუქციის თავისებურების გათვალისწინებით. მატერიალური ბალანსის განსაზღვრა საჭირო იყო ენერგეტიკული ბალანსის ზოგიერთი ნაწილის განსაზღვრისათვის. ღუმელი მუშაობდა კრუპის ფირმის ერთ-ერთ ქარხანაში. ამ ღუმელის ყოველმხრივმა ენერგეტიკულმა ანალიზმა საშუალება მისცა ავტორებს განესაზღვრათ ღუმელის ენერგეტიკული პარამეტრები; დნობის პროდუქტების თბოშემცველობა და დაედგინათ მისი სხვაგან გამოყენების გზები (კაზმის გახურება, ორთქლის მიღება და სხვ.).

ღუმელი აღჭურვილი იყო 1978 წლის ტექნიკური მიღწევების გათვალისწინებით. ღუმელის დიამეტრი - $6,8$ მ, ელექტროდების დიამეტრი - 610 მმ, ტრანსფორმატორის მთლიანი სიმძლავრე - 75 მგვ.ა. ღუმელის კედლები შედგებოდა წყლით საცივებელი 15 სეგმენტისაგან. მას ჰქონდა აირ-ჟანგბადის სამი სანთურა, რომლებიც ჩაირთვებოდა გადნობის პერიოდში. სრული ენერგეტიკული

ბალანსის ანალიზისათვის საჭირო იყო დნობის მატერიალური, ენერგეტიკული და ექსერგეტიკული ბალანსების შედგენა. ლუმენლის ენერგეტიკული მდგომარეობის შესაფასებლად გამოიყენებოდა ენერგეტიკული და ექსერგეტიული მ.ქ.კ.

. 10.2.1.1. მატერიალური ბალანსი

მატერიალური ბალანსი არის ენერგეტიკული ბალანსების შედგენის წინა საფეხური. სურათზე 10.1 გამოსახულია ლუმენლში შესატანი მასალები და დნობის გამოშვებული პროდუქტები. წესით, რა რაოდენობის მასალასაც შევიტანთ ლუმენლში, მივიღებთ შესაბამისი რაოდენობის დნობის პროდუქტებს (ლუმენლში დარჩენილი თხევადის ღლითონის რაოდენობა ყოველთვის ერთი და იგივეა), ანუ საქმე გვაქვს მატერიის მუდმიუობის კანონთან. ამიტომ

$$\sum_{i=1}^j m_i + \sum_{i=k}^n \int_{\text{დ.დ.}}^{E} m_i(\tau) d\tau = 0 \quad (10.1)$$

სადაც დ.დ. არის დნობის დასასრული; დ.დ. – დნობის დასაწყისი.

შემდგომში გამოყენებული იქნება შემდეგი აღნიშვნები:

E_n – ენთალპიის ექსერგია, კვტ.სთ;

E_Q – სითბოს ექსერგია, კვტ.სთ;

H – ენთალპია, კვტ.სთ;

\dot{H}_i – მასალებთან დაკავშირებული ენერგეტიკული ნაკადი (ენთალპიის ნაკადი), კვტ;

m_i – პერიოდულად შემავალი და გამოშვებული მასები, კგ;

\dot{m}_i – უწყვეტად შემავალ და გამოშვალ მასათა ნაკადი, კგ/წმ;

$P_{\text{კ.დ.}}$ – გამოშვებული აირებით გამოწვეული დანაკარგების სიმძლავრე, კვტ;

Δ_p – წნევათა სხვაობა, მილიბარი;

Q – სითბო, კვტ.სთ;

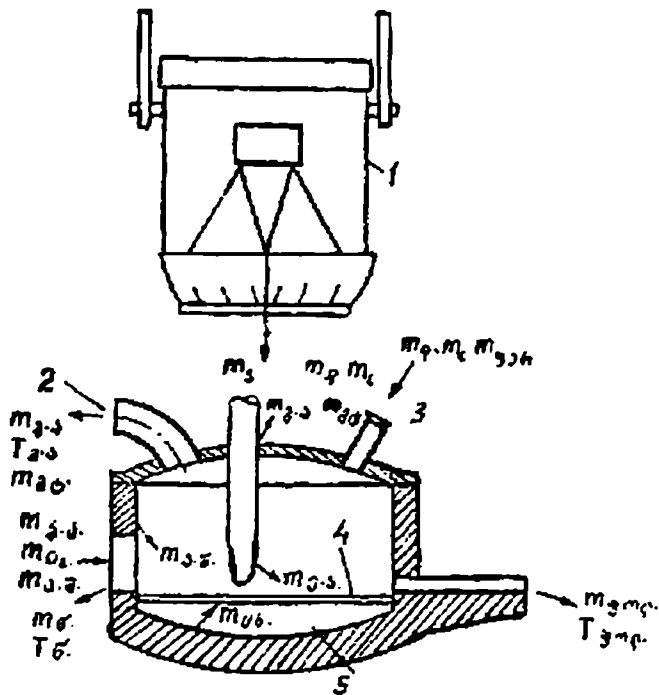
\dot{Q}_i – ენერგიის კონვექციური ნაკადი (თბონაკადი), კვტ;

\dot{R}_i – ენერგიის წყაროს ნაკადები (ენდო და ეგზოთერმული ქიმიური რეაქციები), კვტ;

S – ენტროპია, კვტ.სთ/კ;

\dot{S}_i – გამოსხივების ენერგიის ნაკადი, კვტ;

T – თერმოდინამიკური ტემპერატურა, კ;



სურ. 10.1. ღუმელში შეტანილი მასალები და იქიდან გამოტანილი დნობის პროდუქტები:

1. ჩასატვირთი კალათა ჯართით; 2. აირების გამწოვი მილყელი (თალის მე-4 ხერელი); 3. დანამატების მისაწოდებელი მილყელი (თალის მე-5 ხერელი); 4. წიდა; 5. თხევადი ფოლადი; m - მასა (მასური ნაკადი); T - ტემპერატურა; d - დანამატი; C - დამნახშირბადიანებელი საშუალებები: ფერ - ფერო-შენადნობები; ∇ - წიდა; ბ.ა. - ბუნებრივი აირი; ფოლ. - ფოლადი; მტ - მტვერი; მ.ხ. - მასის ხარჯი ღუმელის შეკეთებაზე; O_2 - ჟანგბადი; ე.ა. - ელექტროდების ამოწვა; ც.ხ. - ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი; ა.შ. - აირების შეწოვა; კ - კაზმი; გა. - გამომავალი აირები.

T_u - გარემოს ტემპერატურა, K;

U - შინაგანი ენერჯია, კვტ.სთ;

W_m - გამომავალი აირებით გამოწვეული დანაკარგების ენერჯია, კვტ.სთ;

ϵ - ექსერგეტიკული მ.ქ.კ.

η - ენერგეტიკული მ.ქ.კ.

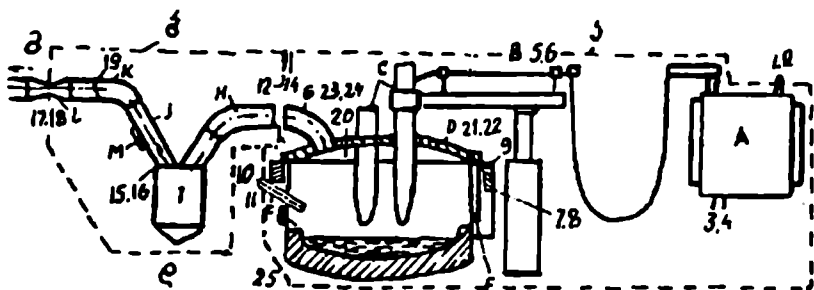
τ - დრო;

იმ მასების ნაკადი, რომლებიც დამოკიდებულია გამოდნობილი ფოლადის ერთეულზე (ელექტროდების ხარჯი, მტვერის გამო-

სავალი და სხვ.), შედიან (1) ტოლობაში, როგორც პერიოდულად შემავალი ან გამომავალი მასები.

10.2.1.2. ენერგეტიკული ბალანსი

ენერგეტიკული ბალანსის გამოსაყვანად გამოიყენება თერმოდინამიკის პირველი კანონი. სურათზე 10.2 გამოსახულია დანადგარის სისტემის ცალკეული მოცულობების ბალანსი. ლუმელის



სურ. 10.2. გასაზომი ხელსაწყოების განლაგება ლუმელზე და აირგამწმენდის სისტემაში. ბალანსირების სივრცული საზღვრები და გასაზომი პარამეტრები: ა - ბალანსის საზღვარი ლუმელისათვის; ბ - იგივე აირგამწმენდისათვის; გ - შემრევი კამერა: A - ტრანსფორმატორი; B - ელექტროდის დამჭერი; C - ელექტროდები; D - წყლით საცივებელი თალი; E - წყლით საცივებელი კედელი; F - რეაქტიული სანთურა; G - აირების გამომწოვი მილყელი; H - მილი; I - უხეში მტერის დამჭერი; J - გამაცივებელი; K - ლუმელში წნევის მარეგულირებელი სარქველი; L - ვენტურის მილი; M - ქაერის შემწოვი სარქველი; 1. ელექტრული სიმბლავრე; 2. ელექტრული მუშაობა; 3,4. გამაცივებელი წყალი; 5,6. ელექტროდის დამჭერების გაცივება; 10,11. რეაქტიული სანთურა; 12-14. გამომავალი აირები; 15,16. გამაცივებელი წყალი და აირგამწმენდა; 17,18. ვენტურის მილი; 19. წყლის ტემპერატურის მარეგულირებელი სარქველი; 20. წნევა ლუმელში; 21,22. თალის გაცივება; 23, 24. აირის გამწოვი მილყელის გამაცივებელი წყალი.

შინაგანი ენერჯიის ბალანსის ტოლობა შედგება ცალკეული ბალანსებისაგან დამოკიდებულებაში და გამოიხატება ტოლობით:

$$\left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{ლუმ}} \sum_{i=1}^n (\dot{H}_i + \dot{Q}_i + \dot{S}_i + \dot{R}_i) \quad (10.2)$$

თუ გავითვალისწინებთ იმ გარემოებას, რომ ყოველი დნობის შემდეგ ლუმელში დარჩენილი ენერჯია მუდმივია, მაშინ (10.2) ტოლობიდან გამოვა

$$\int_{\text{დ.დ.}}^{\text{დ.ბ.}} \sum_{i=1}^n (\dot{H}_i + \dot{Q}_i + \dot{S}_i + \dot{R}_i) dt \quad (10.3)$$

(10.3) ტოლობიდან გამოდის, რომ ღუმელში შემავალი ენერგიის ყველა ნაკადის ჯამი ტოლია იქიდან გამოშვებული ენერგიის ნაკადების ჯამისა. ღუმელში ენერგიის ნაკადების თვალსაჩინოდ წარმოდგენისათვის მიმართავენ ენერგეტიკულ დიაგრამებს.

რა მიზეზები მოქმედებენ ენერგიის ხარჯზე თანამედროვე ზემქლავრი რკალური ღუმელების ენერგიების ხარჯი განისაზღვრება როგორც მეტალურგიული პროცესებით, ასევე ახალი კონსტრუქციების გამოყენებით.

მეტალურგიულ პროცესებს მიეკუთვნება: ლითონის დამუშავება ციციხეში, რაც საშუალებას იძლევა შემცირდეს დნობებს შორის დრო ~1,5 საათით (ლითონის 1640 °C ტემპერატურისას გამოშვების წინ); კაზმის გადნობა – თუ კაზმი შედგება მხოლოდ ჯართისაგან, მაშინ პირველადი ენერგია შემცველის ხარჯი ელექტროფოლადსადნობ წარმოებაში შეადგენს 2000–2200 კვტ.სთ/ტ, ხოლო თუ კაზმი შედგება ღრუბლისებრი რკინისაგან, მაშინ – 8500 კვტ.სთ/ტ. თეორიულად კაზმის გადნობაზე იხარჯება არაუმეტეს 420 კვტ.სთ/ტ ენერგია, როცა ლითონის ტემპერატურაა 1640 °C.

ამონაგჷ. გამოსაკვლევ ღუმელზე ცეცხლგამძლე ამონაგის 60 % შეცვლილი იქნა კედლისა და კამარის დიდი ფართობის წყლით საცივებელი პანელებით. ლიტერატურაში ცნობილია, რომ ღუმელების წყლით გაცივებისას იზრდება ენერგიის ხარჯი 10–20 კვტ.სთ/ტ-ით ჩვეულებრივ ღუმელებთან შედარებით.

ღუმელის სიახლეებია:

1) აბაზანის ზედაპირის შეფარდება მოცულობასთან. ეს შეფარდება ზემქლავრ ღუმელებში გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ჩვეულებრივ ღუმელებში. ამიტომ გამოსხივებით და თბოგადაცემით გამოწვეული თბოდანაკარგები შედარებით მცირეა. ტრანსფორმატორის მაღალი სიმძლავრე (75 მგვ.ა და მეტი) მოითხოვს ღუმელის წყლით საცივებელ ამონაგს;

2) პირველადი ენერგია. აირ-ენაგბადის 3 სანთურა უზრუნველყოფს დამატებითი ენერგიის მიწოდებას ღუმელში და მისი ფაზების თბურ სიმეტრიას გადნობის პერიოდში;

3) ენერგიის რეგენერაცია (აღდგენა). აღებული ღუმელის შემთხვევაში არ ხდება მისგან გამოშვებული სითბოს გამოყენება; გამოშვებული აირების გაწმენდა. ნაქსოვი ფილტრების გამოყენებისას ხდება დამატებითი ენერგიის დახარჯვა (დნობაზე დახარჯული ენერგიის 8–10 %).

10.2.1.3. ექსერგეტიკული ბალანსი

თერმოდინამიკის მეორე კანონის მიხედვით ენერჯიის გარდაქმნას აქვს თავისი ზღვარი. ამიტომ განირჩევიან გარდაქმნილი (ექსერგეტიკული) და გარდაუქმნელი (ანერგეტიკული) ენერჯიები. ყოველი სახის ენერჯიისათვის სამართლიანია ტოლობა: ენერჯია = ექსერგია + ანერგია.

სითბოს ექსერგია და ენთალპია გამოისახება ტოლობებით:

$$(E_Q)_{1,2} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_U}{T}\right) dQ = Q_{1,2} - T_U \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (10.4)$$

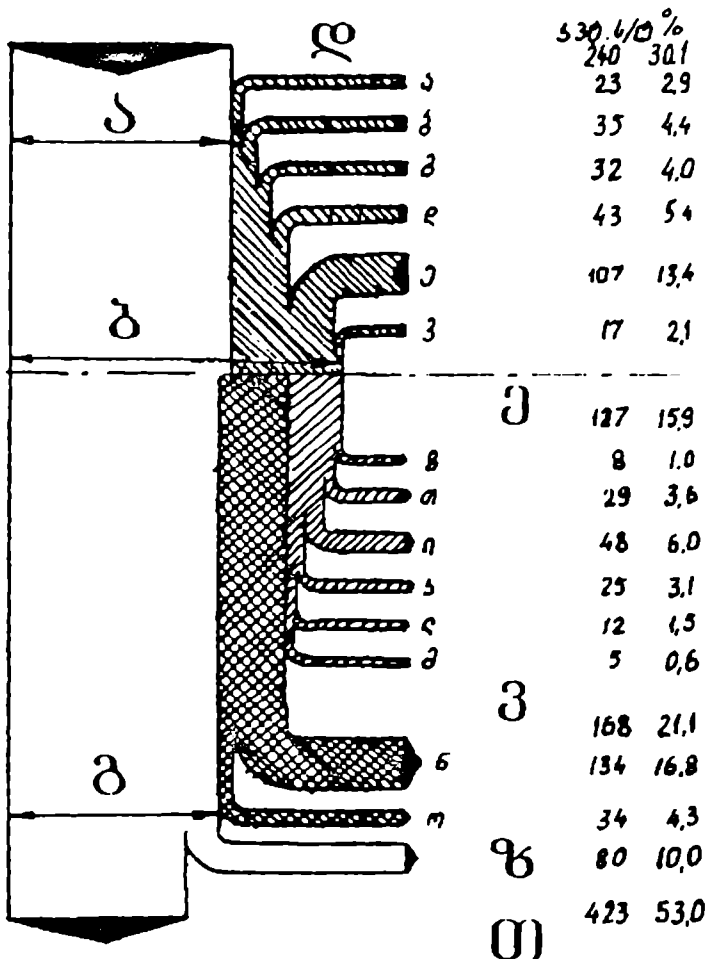
$$E_H = H - H_U - T_U (S - S_U) \quad (10.5)$$

რომ გავითვალისწინოთ თერმოდინამიკის მეორე კანონით შეზღუდული ენერჯიის გარდაქმნის მიდრეკილება და შევაფასოთ მისი თერმოდინამიკური სისრულე, ენერგეტიკული ნაკადები შეიძლება დავეყოთ ორ ნაწილად - ექსერგეტიკულ და ანერგეტიკულ ნაკადებად. ზემოთაღნიშნული ენერგეტიკული, ექსერგეტიკული და პირველადი ენერგოშემცველების დიაგრამები გამოსახულია სურათებზე 10.3, 10.4 და 10.5.

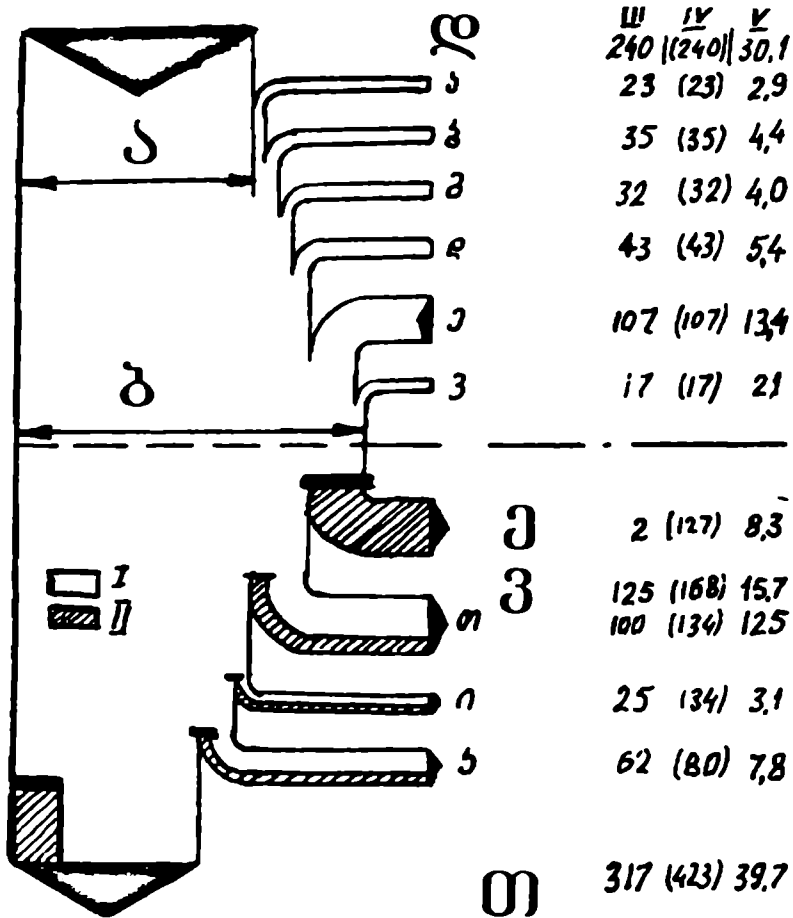
გამოკვლევების მსვლელობისას შედგენილი იყო 7 სხვადასხვა დნობის მატერიალური, ენერგეტიკული და ექსერგეტიკული ბალანსები. სურათზე 10.3. მოყვანილია რკალური ღუმელების ენერგეტიკული ბალანსი. როგორც სურათიდან ჩანს, რკინის ბურბუშელაში არსებული ზეთისა და საცხების წვით მიღებული ენერჯია საკმაოდ დიდია - 107 კვტ.სთ/ტ თხევად ლითონზე. კაზში ბურბუშელას წილია 35 %, ხოლო ზეთებისა და საცხებისა კი - 2,9 %. ბალანსის შეუსაბამობაა (განსხვავება ენერჯიის შემოსავალსა და გასავალს შორის) 2,1 %.

ენერჯიის შემოსავალი ლითონური კაზმით შეტანილი კაუბადის (სილიციუმის), მანგანუმის, ქრომის, გოგირდისა და რკინის ამოწვითა და კირქვის ენდოთერმული დაშლით, რომელიც იფარება სილიკატების წარმოქმნის სითბოთი, არის 35 კვტ.სთ/ტ თხევად ფოლადზე. გამავალი აირების უწყვეტი გაწოვისას ენერჯიის $P_{\text{წ}}$ ცვლილება დროში (სურ. 10.6) გეინყენებს, რომ კაზმის ნატიერთის შემდეგ ჩნდება მკვეთრად გამოხატული პიკი 15-19 ათასი კვტ. სიმართლით, რაც შეტყველებს კაზმში ბურბუშელას დიდ რაოდენობაზე გამავალი აირებით დაკარგული სითბო იანგარიშება ტოლობით:

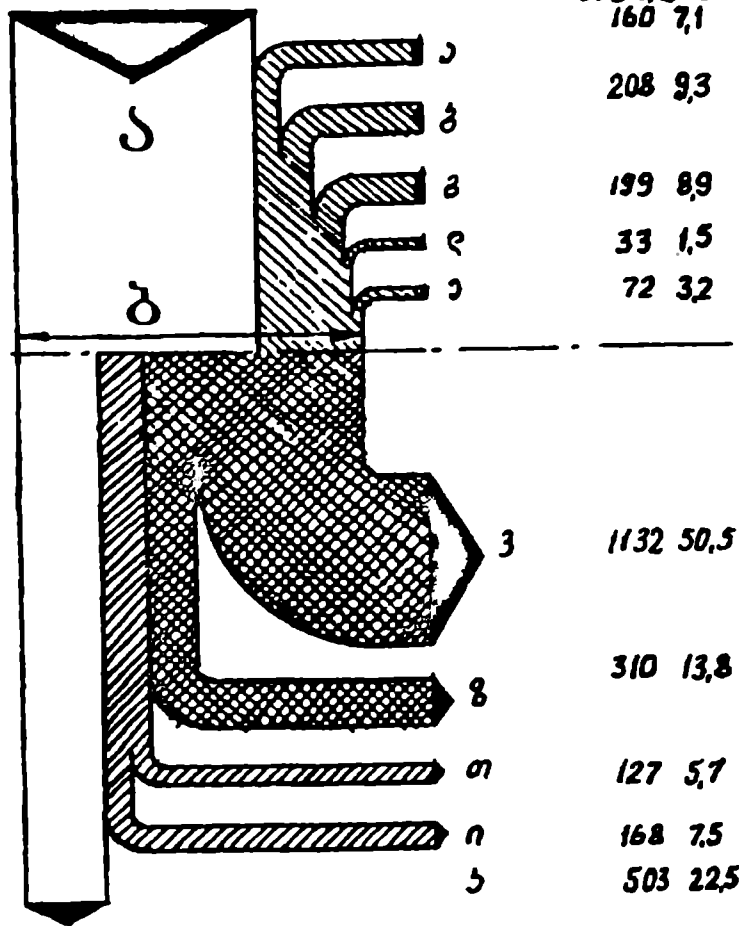
$$W_{\text{ა}} = \int_{\text{ა}}^{\text{ბ}} P_{\text{ა}}(\tau) d\tau \quad (10.6)$$



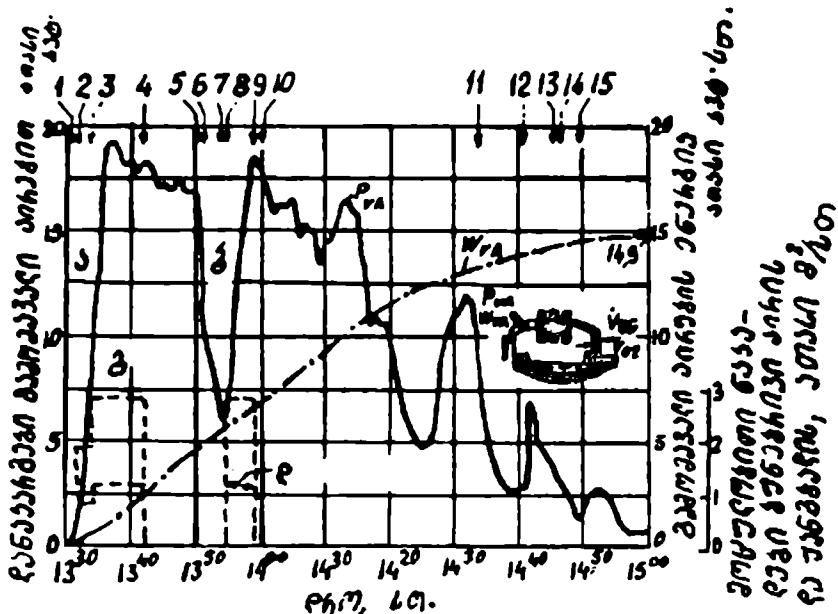
სურ. 10.3. ზემოქვეყნის ლემელის ენერგეტიკული დიაგრამა: ა - 1 ტ. თხევადი ლითონის წარმოებაზე მოსული ელექტროენერგია, 541 კვტ.სთ; ბ - ენერჯის საერთო შემოსავალი, 798 კვტ.სთ/ტ (100 %); გ - სასარგებლო ენერგია 503 კვტ.სთ/ტ (63 %); დ - სათბობი და ქიმიური რეაქციები; ე - დანაკარგები გამაცივებელი წყლით; ვ - დანაკარგები გამავეალი აირებით; ზ - წიდა; თ - ფოლადი; ი - ჟანგბად-აირის სანთურები; კ - ქიმიური რეაქციები; ლ - ელექტროდების დაწვა; მ - დამნახშირბადიანებელი საშუალებები; ნ - ზეთი და კონსისტენციური შემზუთველი კაზმის ბურბუშელაზე; ე - ბალანსის დაუმთხვევლობა; ზ - ტრანსფორმატორი; თ - მოკლე ქსელის გაცივება; ი - კედლების გაცივება; კ - თალის გაცივება; ლ - მილყელები თაღში; მ - ქვედის გაცივება; ნ - სხეები.



სურ. 10.4. ზემოლავრი ღუმელის ექსერგეტიკული დიაგრამა:
 I. ექსერგია; II. ანერგია; III. ექსერგია, კვტ.სთ/ტ;
 IV. ანერგია, კვტ.სთ/ტ; V. ექსერგია, %
 (დანარჩენი აღვნიშვნები იხ. სურ. 10.3).



სურ. 10.5. რკალური ღუმელის პირველადი ენერგიაშემცველების დიაგრამა:
 ა - ელექტროენერგიის მისაღები პირველადი ენერგია, 1568 ევტ.სთ/ტ (70%);
 ბ - მიყვანილი ენერგია, 2240 კევტ.სთ/ტ (100%); ა - საქესპლუტაციო ენერგია (აირგამწმენდი, გამაცივებელი წყალი); ბ - ქიმიური რეაქცია (აირ-ჯანგბადის სანთურები, დამანახშირბადიანებელი საშუალებები, ზეთი და საცხები); გ - ელექტროდები; დ - ჟანგბადი; ე - კირი, კირქვა. ცეცხლმღევი მასალები; ვ - დანაკარგები ელექტროსადგურზე (დენი დნობისათვის, საწარმოო დენი); ზ - მასალების მიწოდება (ჯანგბადი, ელექტროდები, კირი და სხვა); თ - დანაკარგები გამაცივებელი წყლით; ი - დანაკარგები გამავალი აირებით; კ - სასარგებლო ენერგია (ფოლადი და წიდა).



სურ. 10.6. დანაკარგები გამავალი აირებით უშუალოდ გაწოვისას (დიაგრამა შედგენილია პრაქტიკულად მომუშავე ღუმელისათვის): ა - პირველი კალათას ჩატვირთვა; ბ - მეორე კალათას ჩატვირთვა; გ - ჟანგბადის ნაკადი რეაქტიულ სანთურაში; დ - ბუნებრივი აირის ნაკადი რეაქტიულ სანთურაში; 1. ღუმელის ჩართვა (13³¹); 2. ჟანგბადის ქშინის და რეაქტიული სანთურების 2 და 3-ის ჩართვა (13³²); 3. რეაქტიული სანთურა 1-ის ჩართვა (13³⁴); 4. რეაქტიული სანთურების გამორთვა (13⁴²); 5. ღუმელის გამომრთველის გამორთვა (13⁵⁰); 6. ჟანგბადის ქშინის გამორთვა (13⁵¹); 7. ღუმელის გამომრთველის ჩართვა (13⁵⁴); 8. ჟანგბადის ქშინის ჩართვა (13⁵⁵); 9. სანთურების გამორთვა (13⁵⁹); 10. პირველი სინჯის აღება ჯართის გადნობისთანავე (14⁰⁰); 11. ტემპერატურა 1604 °C, შხადება ლითონის გამოშვებისათვის (14²⁴); 12. მეორე სინჯის აღება (14⁴¹); 13. ღუმელის გამომრთველის გამორთვა (14⁴⁶); 14. გამოშვების დაწყება (14⁴⁷); 15. გამოშვების დამთავრება (14⁵⁰).

მთლიანად დნობისათვის მისი სიდიდეა 14,9 ათას კვტ.სთ, ანუ 134 კვტ.სთ/ტ თხევად ლითონზე. ამასთან, ელექტროენერჯის ხარჯი დნობაზე არის 59,7 ათასი კვტ.სთ, ბუნებრივი აირისა - 276 მ³, ჟანგბადის ხარჯი საქშენიდან - 1051 მ³. (1) ტოლობიდან მიღებული ნახშირბადის ბალანსიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ გამავალი აირების 70-80 % გამოიწოვება.

ენერგეტიკული დიაგრამიდან შეიძლება გამოვიყვანოთ შემდეგი მ.კ.კ-ები:

საერთო მ.კ.კ. წილისა და რეაქციების ენთალპიების გაუთვალისწინებლად:

$$\eta = \frac{H_{\text{ფ}}}{Q_{\text{კლ}}} \cdot 100\% = 72.2\% \quad (10.7)$$

სადაც H არის ფოლადის ენერგოტევადობა; $Q_{\text{კლ}}$ - ელექტროენერგია;

საერთო მ.კ.კ. წილის და რეაქციების ენთალპიების გაუთვალისწინებლად, მაგრამ აირ-ჟანგბადის სანთურებით მიწოდებული ენერგიის გათვალისწინებით

$$\eta_{\text{საჯ}} = \frac{H_{\text{ფ}}}{Q_{\text{კლ}} + Q_{\text{აი}}} \cdot 100\% = 75\% \quad (10.8)$$

სადაც $Q_{\text{აი}}$ აირ-ჟანგბადის რეაქციული სანთურებით მიწოდებული ენერგიაა.

საერთო მ.კ.კ. წილისა და რეაქციების ენთალპიების გათვალისწინებით

$$\eta_{\text{ს.წ.რ}} = \frac{H_{\text{სას}}}{Q_1} \cdot 100\% = 64.4\% \quad (10.9)$$

სადაც $H_{\text{სას}}$ არის წიდა-ფოლადის სასარგებლო ენერგია; Q_1 - მიწოდებული ენერგია.

ექსერგეტიკული დიაგრამის (სურ. 10.4) საშუალებით შესაძლებელია თვისებრივად შეფასდეს ღუმელზე მოსული ენერგიების ნაკადი. ელექტროენერგია, სათბობით და ქიმიური რეაქციებით შემომავალი ენერგია შეიძლება მივიჩნიოთ, როგორც ექსერგიის შემოსავალი. ამ შემომავალი ენერგიის სახეებში ექსერგიის წილი სხვადასხვა სიდიდისაა. მაგალითად, გამაცივებელ წყალს გამოსვლისას ისეთი ტემპერატურა აქვს, რომ იგი მთლიანად ანერგიად შეიძლება მივიჩნიოთ. სულ სხვაა გამომავალი აირები, რომლებსაც მაღალი ტემპერატურა და დიდი რაოდენობის ქიმიური რეაქციის უნარი აქვთ. ამიტომ ექსერგიის წილი მათში შეადგენს 75 %-ს. ექსერგეტიკული მ.კ.კ. განისაზღვრება (7-9) ტოლობების მსგავსად:

$$\varepsilon_{\text{ს}} = \frac{E_{\text{ფ}}}{E_{\text{კლ}}} \cdot 100\% = 58.6\% \quad (10.10)$$

$$\varepsilon_{\text{საჯ}} = \frac{E_{\text{ფ}}}{E_{\text{კლ}} + E_{\text{აი}}} \cdot 100\% = 56.2\% \quad (10.11)$$

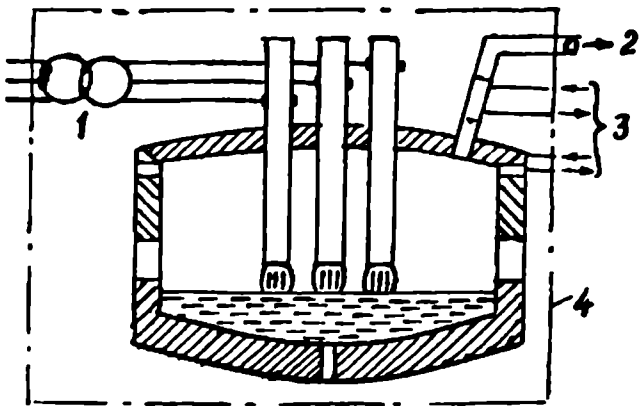
$$E_{\text{ს.წ.რ.}} = \frac{E_{\text{უ}} + E_{\text{წ}}}{Q_{\text{g}}} \cdot 100\% = 49.7\% \quad (10.12)$$

სადაც $E_{\text{უ}}$ არის ფოლადის ექსერგია; $E_{\text{წ}}$ – ელექტროენერგიის ექსერგია; $E_{\text{ა}}$ – ბუნებრივი აირის ექსერგია; $E_{\text{წ}}$ – წილის ექსერგია; Q_{g} – მოყვანილი ენერგია.

ამრიგად, აქ განხილული მაგალითიდან ჩანს, რომ არსებობს გამომავალი აირების ენერგიის გამოყენების კარგი შესაძლებლობა. პირველ რიგში უკეთესი იქნებოდა, თუ ეს ენერგია კაზმის გასახურებლად დაიხარჯებოდა. ყოველ შემთხვევაში, ამ ენერგიის გამოყენება სხვა სფეროშიც ამცირებს ფოლადის თვითღირებულებას.

ზემდღავრი ღუმელების დაპროექტება წყლით საცივებელი ელემენტების გარეშე ამჟამად წარმოუდგენელია. ზემოთ მოყვანილ მაგალითში ენერგეტიკული ბალანსი გაუკეთდა უკვე მომუშავე ღუმელს. ახალი ღუმელების დაპროექტებისას უსათუოდ უნდა იყოს შედგენილი ენერგეტიკული ბალანსი, რადგან რკალური ღუმელი თავის მუშაობისას ძალიან დიდი რაოდენობის ენერგიას მოითხოვს. ენერგეტიკული ბალანსის შედგენა საკმაოდ რთული საქმეა. ამიტომ ახალი ღუმელების დაპროექტებისას უნდა მოხდეს უკვე მომუშავე ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის გამოყენება და გათვალისწინება. ასეთი სამუშაო ჩატარებული იყო [57] ნაშრომის ავტორების მიერ. ამ მაგალითის მოყვანა სასარგებლო იქნება, რადგან, ჯერ ერთი, გავეცნობით დასაპროექტებელი ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის შედგენის ხერხს; მეორეც, ენერგეტიკული ბალანსის შედგენა შეიძლება მხოლოდ მრავალი დაშვებით, ვინაიდან ჯერ არ არსებობს ამის სხვა უფრო ზუსტად დადგენილი მეთოდური საშუალება, ხოლო სხვადასხვა მკვლევარის მიდგომა ამ საკითხებისადმი კი ყოველთვის ერთნაირი არ არის.

ენერგეტიკული ბალანსის შედგენისათვის, ისევე, როგორც წინა მაგალითში, საჭიროა დადგინდეს ენერგიების ნაკადები, რომლებიც გაივლიან რაღაც საზღვარს დროის გარკვეულ მონაკვეთში (სურათი 10.7). ენერგეტიკული ბალანსი შედგენილია გამოშვებიდან გამოშვებამდე პერიოდისთვის. მიღებულია, რომ სისტემას მიეწოდება შემდეგი სახის ენერგიები: ელექტრული, საკაზმე მასალების სითბო და გამოყენებული სათბობის წვის სითბო, ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპია. გამომავალი ენერგია შედგება: დნობის პროდუქტების (ფოლადი, წიდა) და ენდოთერმული ქიმიური რეაქციების ენთალპიების, ღუმელის



სურ. 10.7. რკალური ღუმელის სქემა სისტემების მიღებული საზღვრებით: 1. ტრანსფორმატორი; 2. გამოშავალი აირები; 3. გამაცივებელი წყალი; 4. სისტემების საზღვრები.

ზედაპირიდან დაკარგული სითბოს, ღუმელიდან გამოვარდნილი ალით დაკარგული სითბოს, გამოშავალი აირების ენთალპიის, საცივებელი საშუალებებით წართმეული სითბოსა და ღუმელის აბაზანის გარეთ სითბოდ გარდაქმნილი ელექტროენერჯისაგან.

10.2.1.4. მარგი ქმედების კოეფიციენტის განსაზღვრა

ნაშრომში გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

A – ფართობი, მ²;

C – ხვედრითი თბოტევადობა, კჯ/კგ.K;

F – გადასაყვანი კოეფიციენტი;

$\Delta K_{\text{რ}}$ – დნობის ხვედრითი ენთალპია, კჯ/კგ;

K – თბოგადაცემის კოეფიციენტი, კვტ/მ².K;

M – მასა, ტ (კგ);

P – სიმძლავრე, კვტ;

Q – სითბოს რაოდენობა, კჯ ან კვტ.სთ;

Q – თბური ნაკადი, კვტ;

q – ხვედრითი თბური ნაკადი, კვტ/მ²;

T – ტემპერატურა, T;

t – დრო, წმ ან წთ;

η – მ.ქ.კ.;

σ – გამოსხივების მუდმივა, $5,67 \cdot 10^{-11}$ კვტ/მ².K⁴;

ამ აღნიშვნებთან გამოიყენება შემდეგი ინდექსები: B – აბაზანა; B₀ – ქვედი; D – თალი; E – კაზმი; el – ელექტრული; K – კონვექცია; S – შენადნობი; S_გ – გამოსხივება; W – კედელი ან სითბო; U – გარემომცველი არე.

რკალური ღუმელების თბოტექნიკური შესწავლისას ადრე გამოიყენებოდა „თბური მ.ქ.კ.“, რომელიც წარმოადგენდა შეფარდებას სისტემაში შემომავალ და გამავალ სითბოს ან ენერგიებს შორის. შემდგომში ტერმინი „სითბო“ შეიცვალა უფრო ფართო გაგებით „ენერგია“, სისტემის საზღვარს ენერგია გაივლის რიგორც „თბური“, ასევე „მუშაობის“ სახით. მაგალითად, სითბოს ჯამური მ.ქ.კ.-ები წინათ შემდეგნაირად განისაზღვრებოდა:

$$\eta_w = \frac{(Q_{ფ} + Q_{წიღ})}{(P_{ელ} + Q_{წ})} \quad (10.13)$$

სადაც Q_ფ ფოლადის სითბო; Q_{წიღ} – წიდის სითბო; P_{ელ} – მიყვანილი ელექტრული ენერგია; Q_წ – ეგზოთერმული რეაქციების სითბო.

ყველა გამოყვანილ მ.ქ.კ.-ს აქვს საერთო ნიშნები: მრიცხველში სასარგებლო სითბოდ იგულისხმება მხოლოდ თხევადი ლითონის ენთალპია (ხანდახან თხევადი წილისაც). ეს სითბო ითვლება სასარგებლოდ გამოდნობის პროცესებისა და ფოლადის შემდგომი გადამუშავების თვალსაზრისით. ბოლო ხანებში, ფოლადის თეთლირებულებისა და დნობის წარმოების გაიაფების მიზნით, ცდილობენ გამოიყენონ გამომავალი აირებისა და გამაცივებელი წყლის სითბო. ამნაირად, გამოყენებული სითბო არ შედის სასარგებლო სითბოში. ამიტომ, თუ გვინდა შეფასდეს თანამედროვე ზემძლავრი რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ეფექტურობა (გამომავალი ენერგიების გამოყენებით), ავტორების აზრით, საჭიროა გამოყენებულ იქნეს მ.ქ.კ.-ს სხვა განსაზღვრებები.

თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელების მ.ქ.კ.-ს გამოსათვლელად, თუ მხედველობაში მივიღებთ ზემოთ მოყვანილ მოსაზრებებს, გამოიყენება ენერგეტიკული მ.ქ.კ.-ს განმსაზღვრელი შემდეგი ტოლობა:

$$\eta_E = \frac{E_{სას}}{E_{საერთ.}} \quad (10.14)$$

სადაც E_{სას} სასარგებლო ენერგია; E_{საერთ.} – მთელი მიწოდებული ენერგია.

გამოთქმაში „სასარგებლო ენერგია“ იგულისხმება ენერგიის შემდეგი ფორმები: 1) თხევადი ლითონის ენთალპია დნობის გამოშვების წინ; 2) გამაცივებელი საშუალებების, გამომავალი აირებისა და წილის ენერგიებიდან გამოყენებული ენერგიების რაოდენობა.

აქ ჩამოთვლილი ენერგიებიდან ყველაზე რთულია წიდის ენერჯის გამოყენება. ამიტომ ხშირად ცდილობენ წიდის რაოდენობის შემცირებას. $E_{\text{საჯო}}$ -ში იგულისხმება სისტემისადმი მიწოდებული მთელი ენერჯია: ელექტრული, სათბობის წვით მიღებული სითბო, ეგზოთერმული ქიმიური რეაქციების ენთალპია.

მოსხენებულ ნაშრომში განხილული იყო მომუშავე 55 ტ ტევადობის რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი და მის საფუძველზე შედგა დასაპროექტებელი 110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი.

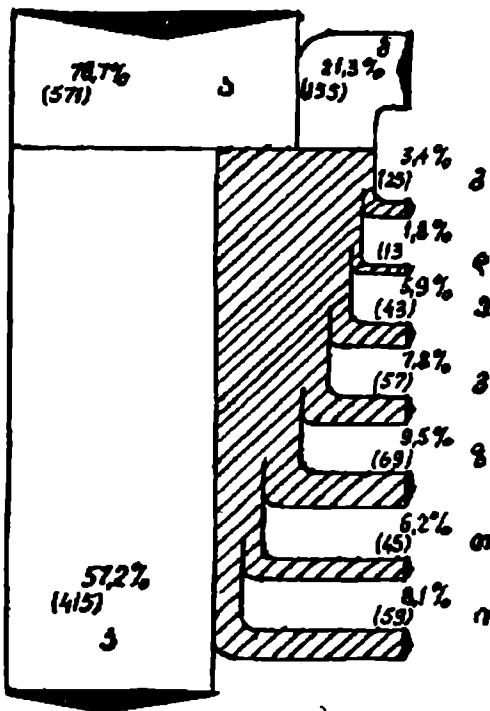
55 ტ ტევადობის ღუმელს, ქვედიდან ლითონის გამოშვებით. ჰქონდა წყლით საცივებელი 27 მ² ფართობის კედლის პანელები. დნობის პარამეტრების შერჩევისას ცდილობდნენ რაც შეიძლება მიახლოებოდნენ დასაპროექტებელი 110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელების პარამეტრებს: დნობის მცირე დრო (< 90 წუთი). დიდი მიწოდებული სიმძლავრე, მცირე დრო ლითონის დუღილსა და გადახურებაზე (<40 წუთი), ლითონის შეზღუდული მეტალურგიული დამუშავება ღუმელში. 55 ტ ტევადობის რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის ზოგიერთი მონაცემი მოყვანილია სურათზე 10.8. ბალანსი შედგენილია საშუალო ნახშირბადიანი (0,35 % C) ფოლადის დნობისათვის. დნობის ხანგრძლივობაა 130 წუთი. საყურადღებოა ის გარემოება, რომ თალიდან გაწოვილი აირების ენთალპია შედარებით მცირეა. ამის მიზეზად უნდა ჩაითვალოს ჯართში მცირე რაოდენობით ზეთებისა და საცხებების მოხვედრა. ბალანსის გაუწონასწორებელ ნაწილში შედის: ელექტრული დანაკარგები, სხვადასხვა დანაკარგები გამაკვივებელი წყლით და ბალანსის შეუსაბამობა.

რადგან 55 ტ ტევადობის ღუმელი არ იყო აღჭურვილი დამატებითი სანთურებით და არ ხდებოდა გამომავალი ენერჯის აღდგენა, ენერგეტიკული მ.ქ.კ. შეიძლება განისაზღვროს (10.14) ტოლობით

$$\eta_E = \frac{H_{\text{ფ}}}{P_{\text{კლ}} + H_{\text{გ}}} \quad (10.15)$$

სადაც $H_{\text{ფ}}$ არის თხევად ფოლადის ენთალპია; $P_{\text{კლ}}$ - მიყვანილი ელექტროენერჯია; $H_{\text{გ}}$ - ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპია. გამოთვლილი $\eta_E=0,57$; შედარებისათვის გამოანგარიშებული იყო (10.13) ტოლობაში მოყვანილი სითბოს ჯამური მ.ქ.კ. $\eta_{\text{მ}}=0,65$.

110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის შესადგენად ავტორებმა შეიმუშავეს მისი მატერიალური და ენერგეტიკული მოდელი. ამასთან, შეძლებისდაგვარად, გამოიყენეს 55 ტ ტევადობის ღუმელზე ჩატარებული ცდების შედეგები. 110 ტ



სურ. 10.8. 55-ტონიანი ტევადობის ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი (ფრჩხილებში მოყვანილ რიცხვებში იგულისხმება 1 ტ ლითონზე მოსული ენერგია, კვტ.სთ-ით): ა - მიყვანილი ელექტროენერგია; ბ - ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპია; გ - ენდოთერმული რეაქციების ენთალპია; დ - გამოსხივება ღუმელის ზედაპირის მიერ; ე - განსაკუთრებული დანაკარგები (ღუმელიდან ალის გამოვარდნებით); ვ - თალის ხერელიდან გამომავალი აირების ენთალპია; ზ - კედლის წყლით გამაცობებელი ელემენტებით გამოტანილი სითბო; თ - ნარჩენი წვერი; ი - წილის ენთალპია; კ - ფოლადის ენთალპია.

ტევადობის რკალურ ღუმელს უნდა აქონოდა შემდეგი ძირითადი ტექნიკური მახასიათებლები:

გარსაცმის დიამეტრი, მ	-----	6.8
კაზმის ნომინალური მასა, ტ	-----	118
ტრანსფორმატორის მთლიანი სიმძლავრე, მგვ.ა	-----	75
პირველადი ძაბვა, კვ	-----	110
ელექტროდის დიამეტრი, მმ	-----	800
გადნობის მინიმალური დრო, წთ.	-----	63
დნობის ხანგრძლივობა, წთ	-----	130

წყლით საცივებელი ნაწილების ფართობი, მ ² : -----	
კედლები -----	43
თალი -----	28
აირების სავალი გზების -----	80
გამაცივებელი წყლის ტემპერატურა	
10 ბარი წნევისას, °C -----	110

ავტორებმა გააკეთეს ერთი დაშვება, რაც გამოიხატება შემდეგში: მასალები, რომლებიც ჩაიტვირთებიან 110 ტ ტევადობის ღუმელში და იქიდან გამოდიან, აგრეთვე, ყველა გარდაქმნა, რომლებსაც ისინი ღუმელში განიცდიან, შესავსია 55 ტ ტევადობის ღუმელში მიმავალი იმგვარივე პროცესებისა. ასეთ დაშვებას არ უნდა მოჰყვეს დიდი შეცდომები იმის გამო, რომ 55 ტ ტევადობის ღუმელში გამოყენებული კაზმის ქიმიური შედგენილობა და დნობის ცალკეული პერიოდების ხანგრძლივობა შეესაბამებოდა 110 ტ ტევადობის ღუმელში დასაგეგმარებელ პირობებს. ამიტომ იანგარიშეს მხოლოდ გადასაყვანი კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებდა საკაზმე მასალების მასის გაზრდას 110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის

$$F = \frac{M_{110}}{M_{55}} \quad (10.16)$$

სადაც M_{110} და M_{55} არის საკაზმე მასალების მასა შესაბამისად 110 და 55 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის. ამ გადასაყვანი კოეფიციენტით შეიძლება ერთი მხრივ კაზმის შემადგენელი ნაწილების, დანამატებისა და ა.შ. მასების, ხოლო მეორე მხრივ ღუმელიდან გამოსული მასალების მასების ანგარიში.

გამომავალი აირების ენთალპია. კამარაში გაკეთებული ნახვრეტიდან გამომავალი აირების ენთალპიის განსაზღვრისათვის საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ სითბოს გადასვლა აირების გამოსაყვან ადგილას წყლით საცივებელ უბანზე მაშინ გამომავალი აირების ენთალპია 110 ტ ტევადობის ღუმელიდან აირების გამოსაყვან ადგილას წყლით საცივებელი უბნის მიღმა ტოლი იქნება:

$$H_{110} = H_{55} \cdot F - \Delta Q_{110}$$

სადაც, H_{110} და H_{55} - 110 და 55 ტ ტევადობის ღუმელებიდან გამომავალი აირების ენთალპიებია შესაბამისად; F - გადასაყვანი კოეფიციენტი; ΔQ_{110} - სითბოს გადასვლა აირების გამოსაყვან ადგილას წყლით საცივებელ უბანზე. საცივებელ უბანზე თბური ნაკადის საშუალო სიმკვრივე 110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის მიღებულია 15 კვტ/მ².

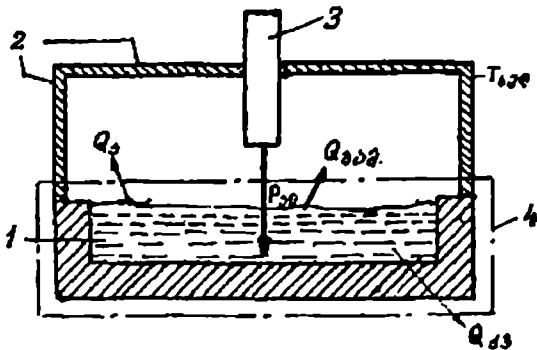
თბოღანაკარგები გარემოში. ეს დანაკარგები ორი ნაწილი-საგან შედგება: დანაკარგები ღუმელის ზედაპირიდან (რადიაცია და კონვექცია) და სითბოს დანაკარგები ჩატვირთვისას. 110 ტ ტევადობის ღუმელის ზედაპირიდან თბოღანაკარგების ანგარიშისას ავტორებმა ისარგებლეს [4, 8] ნაშრომებში გამოქვეყნებული ხერხით. ამასთან გაითვალისწინეს, რომ 110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის კედლებიდან და კამარიდან სითბოს დაკარგვის პირობები განსხვავდება 55 ტ ტევადობის ღუმელის მსგავსი უბნებიდან სითბოს კარგვისაგან. კაზმის ჩატვირთვისას სითბოს დანაკარგების ანგარიშისათვის, გაითვალისწინეს, რომ 110 ტ ტევადობის ღუმელის კამარის მიერ სითბოს დანაკარგები გაცილებით ნაკლებია მისი წყლით გაცივების გამო, ვიდრე 55 ტ ტევადობის ღუმელის კამარიდან.

სითბო, რომელიც მიაქვს კამარის საცივებელ ელემენტებს. რადგან კამარის წყლით საცივებელი ელემენტების მიერ სითბოს წაღების შესახებ [4, 8] ავტორებს სამუშაოს ჩატარებისას არ გააჩნდათ სარწმუნო მონაცემები, ამიტომ მათ ისარგებლეს მოდელით, რომლითაც საშუალება მიეცემოდათ განესაზღვრათ თაღის წყლით საცივებელი ელემენტების წართმეული სითბოს რაოდენობა. კაზმისა და თაღის ელემენტებს შორის ხდება პირდაპირი რადიაციული თბოგაცვლა. ამიტომ განსაზღვრული იყო პირველად კაზმის ტემპერატურის ცვლილება გადნობის პერიოდში. ამასთან, მიღებული იქნა შემდეგი დაშვებები: მთელ აბაზანას აქვს ერთნაირი ტემპერატურა T_E ; კედლებისა და თაღის წყლით საცივებელ ელემენტებს აქვთ ერთნაირი და მუდმივი ტემპერატურა T_w ; გადნობის პერიოდში კაზმის საშუალო ტემპერატურა განუწყვეტლივ იზრდება თხევადი ფაზის მიღებამდე. ანუ კაზმის ნაჭრები გამუდმებით დნება გადნობის მთელი პერიოდის განმავლობაში. სურათზე 10.9 გამოსახულია გამარტივებული სქემა კაზმის ენერგეტიკული ბალანსის შესადგენად. ამ სქემის მიხედვით შეიძლება დაიწეროს:

$$M \cdot \bar{C} \cdot \frac{dT_E}{dt} = P_{\text{კვ}} - \dot{Q}_{s+r} - \dot{Q}_k - \dot{Q}_{Bo} \quad (10.17)$$

სადაც \bar{C} კაზმის საშუალო ხვედრითი თბოტევადობაა გადნობის ტემპერატურამდე, გადნობის ენთალპიის გათვალისწინებით.

$$\bar{C} = \frac{\int_{T_u}^{T_s} c \cdot dT + \Delta h_s}{T_s - T_u} \quad (10.18)$$



სურ. 10.9. გამარტივებული სქემა კაზმის ენერგეტიკული ბალანსის შესადგენად: 1. კაზმი; 2. თაღის და კედლების წყლით საცივებელი ელემენტები; 3. ელექტროდი; 4. სისტემის საზღვარი.

$P_{\text{ელ}}$ - კაზმში შეყვანილი ელექტრული აქტიური სიმძლავრე (მუდმივი), რომელიც დამოკიდებულია გადნობის ხანგრძლივობაზე და თბურ დანაკარგებზე;

$Q_{\text{სრ}}$ - ეფექტური თბური გამოსხივება კაზმიდან ღუმელის კედლებსა და კამარაზე, რომელიც საკმაო მიახლოებით შეიძლება ვიანგარიშოთ ტოლობით:

$$Q_{\text{სრ}} = \epsilon_E \cdot A_E (T_E^4 - T_W^4) \cdot \sigma \quad (10.19)$$

\dot{Q}_k - კონვექციის თბური ნაკადი კაზმის ზედაპირიდან კედლებისა და კამარისაკენ;

$$\dot{Q}_k = K \cdot A_E \cdot (T_E - T_W) \quad (10.20)$$

$\dot{Q}_{\text{ბო}}$ - თონაკადები ღუმელის ქვედიდან, რომელიც მიღებულია მუდმივად;

(10.18), (10.19) და (10.20) გამოსახულებების ჩასმით (10.17) ტოლობაში მივიღებთ:

$$\frac{dT_E}{dt} + \frac{\epsilon_E \cdot \sigma A_E}{MC} \cdot T_E^4 + \frac{K \cdot A_E}{MC} = \frac{P_{\text{ელ}} - \dot{Q}_{\text{ბო}} + \epsilon_E \cdot \sigma \cdot A_E \cdot T_W^4 + K \cdot A_E T_W}{MC} \quad (10.21)$$

ეს დიფერენციალური განტოლება ამოხსნილი იყო რიცხობრივი ხერხით. გამოირკვა, რომ T_W -ს გაზრდა 900 K-მდე ამცირებს გადნობის ხანგრძლივობას 1,2 წუთით (4 %). კაზმის გახურებაზე კედლებისა და კამარის ტემპერატურის ასეთი უმნიშვნელო გავლენა აიხსნება ღუმელში დიდი აქტიური სიმძლავრის (45,5 მგეჯ) შეყვანით. მასთან შედარებით საერთო თბური დანაკარგები, განსაკუთრებით კაზმის, 1000 K-ზე ქვევით, იმდენად მცირეა, რომ თითქმის არ

ახდენს გაველენას. კამარის მიერ სითბოს წაღებას ავტორები შემდეგი ხერხით განსაზღვრავდნენ: რაღაც მცირე Δt დროის განმავლობაში კაზმის ტემპერატურას თელიან მუდმივად და ინერციის მეთოდით გამოთვალეს კამარის ერთეული ფართობიდან ხვედრითი სითბოს ნაკადი დროის ამ მონაკვეთში. ამასთან, არ იყო გათვალისწინებული რადიაციული თბოგაცვლა ელექტრულ რკალსა და კამარის ელემენტებს შორის. ამ შემთხვევაში კამარის წყლით საცივებელი ელემენტების მიერ წაღებული სითბო გადნობის პერიოდში შეიძლება ვიანგარიშოთ ცალკეული დროის ინტეგრელებში შთანქმული სითბოს შეჯამებით

$$Q_D = A_D \cdot \sum_i \dot{q}_D \cdot \Delta t_i \approx A_D \int_0^i q_D \cdot dt \quad (10.22)$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გადნობის პერიოდის დამთავრების შემდეგ თბური ნაკადები თხევადი აბაზანიდან მუდმივია. ამასთან, ღებულობენ გარკვეულ საშუალო მუდმივ ტემპერატურას აბაზანის ზედაპირისათვის, რომელიც დამოკიდებულია გადახურების ხარისხზე. მიღებული იყო კიდევ რამდენიმე დაშვება: კაზმის ჩატვირთვისას კამარის წყლით საცივებელი ელემენტები არ განიცდიან არანაირ თბური ნაკადის გაველენას, რადგან ისინი გადაწეულია ღუმელიდან და, წარმოდგენილი მოდელის მიხედვით, არ გააჩნია თბოტევადობა; დუღილის და გადახურების პერიოდებში მიიღება აბაზანის რაღაც გარკვეული საშუალო მუდმივი ტემპერატურა. ასეთი გამოთვლებით მიიღეს, რომ კამარის წყლით საცივებელი ელემენტების ზედაპირები სუფთაა, სითბოს გადაცემა ტოლია 5635 კვტ.სთ-სა, რაც შეესაბამებოდა 93 კვტ/მ² საშუალო ხვედრით თბურ ნაკადს.

10.2.1.5. სითბო, რომელიც მიაქვს ღუმელის კედლის ელემენტებს

სითბოს ეს დანაკარგები განსაზღვრული იყო 55 ტ ტევადობის ღუმელის მსგავსი დანაკარგების ექსტრაპოლაციით ანუ გადატანით 110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის. ამასთან, გაანალიზებული იყო რამდენიმე უმნიშვნელოვანესი ფაქტორი: კედლის წყლით საცივებელი ელემენტების საერთო ფართობი; რკალების წიდაში და ჯართში ჩაშვების სიჩქარე; რკალის ზედაპირის მიერ გამოსხივებული სიმძლავრის შეფარდება კედლების ფართობთან;

გამოსხივების კოეფიციენტი და გეომეტრიული თანაფარდობა; აბაზანისა და კედლის წყლით საცივებელი ელემენტების ზედაპირების ტემპერატურები; დნობის მსუელელობა ღუმელის მუშაობის დროსა და რეჟიმში.

ამ ფაქტორების შედარებამ ავტორებს უჩვენა, რომ ძირითადად რამდენადმე განსხვავდება მხოლოდ აბაზანას, კამარასა და კედლებს შორის გამოსხივების კოეფიციენტები და აგრეთვე კედლების წყლით საცივებელი ელემენტების ფართობები.

კედლების ელემენტებით გატანილი სითბოს რაოდენობის შეფარდება 110 და 55 ტ ტევადობის ღუმელისათვის გამოვიდა 1,50-ის ტოლი. ამრიგად, 110 ტ ტევადობის ღუმელის კედლების წყლით საცივებელი ელემენტებით გატანილი ხვედრითი სითბო დაახლოებით 25 %-ით უფრო ნაკლებია, ვიდრე 55 ტ ტევადობის ღუმელისათვის.

ბალანსის ნაშთური წვერიც აღებული იყო 55 ტ ტევადობის ღუმელიდან გადამყვანი კოეფიციენტის გამოყენებით (ტოლობა 10.16).

სისტემაში შეყვანილი ელექტრული ენერგია განისაზღვრება ღუმელიდან საერთო გამოყვანილი და ქიმიური ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპიების სითბობებს შორის სხვაობით.

110 ტ ტევადობის ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი, მიღებული შემოთავაზებული მოდელით, მოცემულია სურათზე 10.10. 10.1 და 10.2 ცხრილებში მოცემული 110 ტ ტევადობის ღუმელის მახასიათებლები შედარებულია 55 ტ და ტრადიციული 80 ტ ტევადობის ღუმელების მახასიათებლებთან.

ცხრილი 10.1

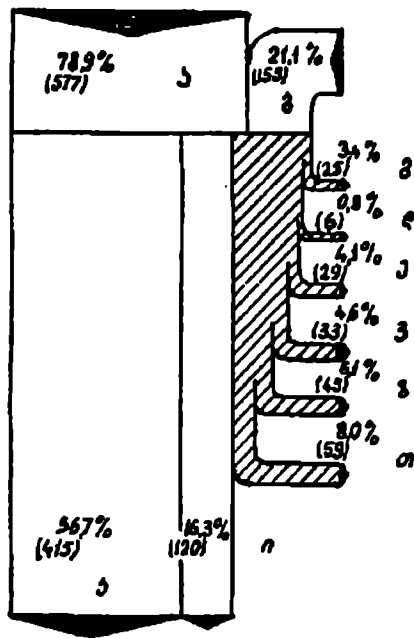
შესადარებელი ღუმელების მახასიათებლები

	I	II	III
ა	1981	1979	1963
ბ	6,8	4,9	5,7
გ	110,5	46,0	77,7
დ	2,17	2,17	7,95
ე	679	652	193

I - 110 ტ ტევადობის ღუმელი; II - 55 ტ ტევადობის ღუმელი; III - 80 ტ ტევადობის ღუმელი; ა - ექსპლუატაციის დაწყების თარიღი; ბ - აბაზანის დიამეტრი, მ; გ - დნობის მასა გამომშვებისას, ტ; დ - დნობის ხანგრძლივობა, სთ; ე - ტრანსფორმატორის სიმძლავრე 1 ტ თხევად ლითონზე, კვა;

ენერგეტიკული მ.ქ.კ. 110 ტ ტევადობის ღუმელისთვის ტოლია

$$\eta_{\text{გ}} = \frac{H_{\text{გ}} + Q_{\text{გ.წ.}}}{P_{\text{კლ}} + H_{\text{გ}}} \quad (10.23)$$



სურ. 10.10. 110 ტონიანი ტევადობის ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი
(ფრჩხილებში - 1 ტ ლითონზე მოსული ენერგია, კვტ.სთ)

ა - მიყვანილი ენერგია; ბ - ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპია; გ - ენდოთერმული რეაქციების ენთალპია; დ - გამოსხივება ღუმელის ზედაპირის მიერ; ე - განსაკუთრებული დანაკარგები (ცეცხლის ალების გამოსვლისას); ვ - გამოშავალი აირების ენთალპია აირგამომყვანის გამაცივებელი უბნის გარეთ; ზ - ბალანსის ნარჩენი წვერი; თ - წიდის ენთალპია; ი - სასარგებლოდ გამოყენებული გამაცივებელი წყლის ენთალპია; კ - ფოლადის ენთალპია.

სადაც $Q_{\text{წ}} -$ გამაცივებელი წყლისგან გამოყენებული სითბო.

თუ 110 ტ ტევადობის ღუმელიდან გამოყვანილი სითბოს გამოყენება არ მოხდება, მაშინ ორივე ღუმელს ერთნაირი ენერგეტიკული მაჩვენებლები ექნება, ხოლო თუ გამოყვანილი სითბო გამოიყენება, მაშინ 110 ტ ტევადობის ღუმელის ენერგეტიკული მ.კ.კ. იქნება 0,73, მაშინ როცა 55 ტ ტევადობის ღუმელისაა 0,57, ხოლო ტრადიციული 80 ტ ტევადობის ღუმელისა კი - 0,52. ტრადიციული ღუმელისათვის ასეთი დაბალი მ.კ.კ. აიხსნება იმით, რომ ის მუშაობს დიდი რაოდენობის წიდებზე. ნაშრომის ავტორების აზრით თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელები წყლით საცივებელი ამონაგით და დნობის მცირე ხანგრძლივობით არ შეიძლება ჩაითვალოს უფრო ეკონომიურად ჩვეულებრივ

შესადარებელი ღუმელების ენერგეტიკული ბალანსის წყაროები

	I	II	III	IV	V	VI
ა	78,9	577	78,7	571	82,3	607
ბ	21,1	155	21,3	155	17,7	131
Σ	100	732	100,0	726	100,0	738
გ	56,7	415	57,2	415	56,6	381
დ	8,0	59	8,1	59	11,3	83
ე	3,4	25	3,4	25	-	-
ვ	0,8	6	1,8	13	9,5	70
ზ	4,1	29	5,9	43	2,3	17
თ	4,6	33	7,8	57	6,8	50
ი	3,2	24	ა. მ.	ა. მ.	0	0
კ	6,1	45	9,5	69	0	0
ლ	7,0	51	0	0	0	0
მ	6. წ.	-	6. წ.	-	5,8	43
ნ	6. წ.	-	6. წ.	-	12,7	94
ო	6,1	45	6,2	45	0	0
Σ	100	732	100,0	726	100,0	738
η _w	0,65		0,65		0,63	
η _E	0,73 (0,57)		0,57		0,52	

I - 110 ტ ტევადობის ღუმელი, %. II - იგივე, კვტ.სთ/ტ თხევად ფოლადზე; III - 55 ტ ტევადობის ღუმელი, %. IV - იგივე, კვტ.სთ/ტ თხევად ფოლადზე; V - 80 ტ ტევადობის ღუმელი, %. VI - იგივე, კვტ.სთ/ტ თხევად ფოლადზე; ა - მიყვანილი ელექტროენერჯია; ბ - ეგზოთერმული რეაქციების ენთალპია; გ - თხვეადი ფოლადის ენთალპია; დ - წიღის ენთალპია; ე - ენდოთერმული რეაქციების ენთალპია; ვ - ზედაპირიდან გამოსხივებით გამოწვეული დანაკარგები; ზ - განსაკუთრებული დანაკარგები (აღის გამოვარდნებით); თ - გამოშავალი აირების ენთალპია; ი - სითბო, რომელიც მოაქვს გამაცივებელ წყალს აირების გამოსვლის ადგილებიდან; კ - იგივე, კედლების ელემენტებიდან; ლ - იგივე კამარის ელემენტებიდან; მ - იგივე სხვა ელემენტებისაგან; ნ - ელექტრული დანაკარგები; ო - ბალანსის ნარჩენი წვერი; ა. მ. - ძალიან მცირე; ნ.წ. - შედის ბალანსის ნარჩენ წვერში; Σ - ჯამი; η_w - თბური მ.ქ.კ. გამოთვლილი (10.1) ტოლობით; η_E - ენერგეტიკული მ.ქ.კ. გამოთვლილი (10.2) ტოლობით.

ღუმელებთან შედარებით, თუ არ იქნება ჩატარებული დამატებითი ღონისძიებები. ღუმელის ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბო და ნაკლები ელექტრული დანაკარგები იფარება გამაცივებელ წყალთან დაკარგული სითბოთი. ამრიგად, ენერჯის ეკონომიის მიზნით, უნდა მოხდეს ღუმელიდან გამოყვანილი სითბოს ხელმეორედ გამოყენება.

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის შესადგენად საჭიროა ვიცოდეთ შემავალი და გამოყვანილი (გამომავალი) ენერჯიების მნიშვნელობები. ზემოთ აღნიშნულ

მაგალითებში სწორედ ასე მიდიოდა ანგარიში. მაგრამ, უნდა ითქვას, რომ ყველა მკვლევარი ერთნაირად არ უდგება ამ საკითხს. ენერგეტიკული ბალანსი რომ შემავალი და გამოყვანილი ენერგიების გათვალისწინებით უნდა გაკეთდეს, ეს ყველასათვის ცნობილია. განსხვავებული მოსაზრებები არსებობს მხოლოდ ამ ენერგიების შემადგენელი ნაწილების განსაზღვრისადმი მიდგომაში.

მაგალითად, [10] ნაშრომის ავტორის აზრით, შემავალი ენერგიები შედგებიან: აქტიური ელექტროენერგიისაგან $W_{ელ} \cdot W_{ელ}$ – ელექტროენერგიის ხვედრითი ფაქტობრივი ხარჯი განსახილველ პერიოდში ან მთლიანად დნობისას, $W_{ელ}$ – დანადგარის მ.ქ.კ., რომელიც მახასიათებელია ღუმელის შიგნით გამოყენებული აქტიური სიმძლავრის შეფარდებისა ტრანსფორმატორის პირველად გრანვილზე მოსულ აქტიურ სიმძლავრესთან; ეგზოთერმული ქიმიური რეაქციების თბური ენერგიების ჯამისგან ენდოთერმულის გამოკლებით $\sum W_{ქ}^0$ (განისაზღვრება სტანდარტული ენთალპიების ცვლილებებით ღუმელის სამუშაო არეში), მაგრამ განსხვავებული მოსაზრება გამოითქმება ღუმელიდან გამომავალი აირების (რეაქციების პროდუქტების) გასახურებლად საჭირო ენერგიის შესახებ. ავტორის აზრით, ელექტრული ენერგიის შეჯამებისას თბურ ენერგიებთან, რომლებიც გამოიყოფა ღუმელის სამუშაო არეში, უნდა იგულისხმებოდეს სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა თვითონ ღუმელის სამუშაო არეში და არა ის ენერგია, რომელიც მიდის რეაქციების პროდუქტების ენთალპიის გასაზრდელად. ამიტომ ავტორს შემოაქვს კოეფიციენტი $\eta_{ქ}$, რომელიც ითვალისწინებს $W_{ქ}^0$ სიდიდის შესწორებას $W_{ელ} \cdot \eta_{ელ}$ ანუ $\sum W_{ქ}$. ღუმელის სამუშაო არეში წინასწარ გადახურებული მასალების ენერგიისგან და აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას მიღებული დამატებითი ენერგიისგან. აიროვანი ჟანგბადის ღუმელში შებერვისას გამოყოფილი ენერგია შეიძლება მიეკუთვნოს $\sum W_{ქ}$ -ს ანდა გადაითვალოს შესაბამის ელექტროენერგიაში და გამოაკლდეს $W_{ელ}$ (მიღებულია, რომ 1 მ³ დახარჯული ჟანგბადი 3–3,5 კვტ.სთ ელექტროენერგიის ტოლფასია).

გამომავალი ენერგიები შედგება: სასარგებლო ენერგიისაგან $W_{სარ}$, რომელიც იხარჯება ლითონისა და კაზმის გასადნობად და გასახურებლად; ღუმელის გარე ზედაპირიდან, სამუშაო ფანჯრიდან და კამარის გადაწვევისას დაკარგული სითბოს რაოდენობისაგან $W_{კარ}$; კედლების ამონაგით შენახული სითბოსაგან $W_{სთ}$; ბოლო სიდიდე სხვადასხვა ავტორებს შეჰყავთ როგორც შემავალი, ისე გამავალი ენერგიების ნაწილებში, რადგან მისი გავლენა

ძალიან მცირეა საერთო ენერგეტიკულ ბალანსზე და ძალიან ძნელია მისი გაველენის განსაზღვრა პრაქტიკულადაც.

როგორც ჩანს, ძირითადი განსხვავება მაინც მდგომარეობს გამავალი აირების მიერ გამოტანილი სითბოს რაოდენობაში. ავტორს მოჰყავს საინტერესო მოსაზრება: ღუმელიდან აირების გამოსვლა დაკავშირებულია იმ სიძნელეებთან, რაც გამოიხატება მათი მოცულობისა და შედგენილობის მუდმივ და მნიშვნელოვან ცვლილებებთან დნობის განმავლობაში. მაგრამ, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მაღალ ტემპერატურამდე გახურებული CO-სა და CO₂-ის ენთალპიები არ შეიძლება მიეკუთვნოს ღუმელის თბურ დანაკარგებს, რადგან ისინი არ ხურდებიან ღუმელში გამოყენებული ენერგიების ხარჯზე. ამავე დროს, ნახშირბადის ჟანგეულებთან ერთად ღუმელიდან გამოიყოფა სხვა აირებიც – გამოუყენებელი ჟანგბადი, აზოტი, წყლის ორთქლი. რომლებიც არ მონაწილეობენ ქიმიურ რეაქციებში, მაგრამ ხურდებიან ღუმელში გამოყოფილი ენერგიების ხარჯზე. სწორედ ამ აირების ენთალპიები უნდა მიეკუთვნონ ღუმელიდან გამომავალი აირებით სითბოს დანაკარგებს.

მაგალითად, ორი ენერგეტიკული ბალანსიდან, რომელიც შედგენილია 150 ტ ტევადობის ერთი ღუმელისათვის მუშაობის სხვადასხვა დროს, ჟანგბადის გამოყენებისას გამავალ აირებთან ერთად დაკარგული სითბოს რაოდენობა 2,5-ჯერ გაიზარდა უმთავრესად ღუმელში გამოყოფილი CO-სა და CO₂-ის ხარჯზე (ცხრ. 103).

ავტორის აზრით, გაიზარდა სითბოს დანაკარგები გამომავალ აირებთან ერთად 220 მჯ/ტ-ით (რაც აჭარბებს ჟანგბადის გამოყენებით მიღებულ ეფექტს), მიუხედავად იმისა, რომ შემცირდა სასარგებლო სითბოს ხარჯი, ხოლო ელექტროენერგიის ხვედრითი ხარჯი შემცირდა კიდევ. ამ შეუსაბამობის ახსნა შეიძლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში. რასაც უშვებდნენ გამომავალ აირებთან ერთად დაკარგული სითბოს განსაზღვრისას. ნაანგარიშები უნდა იყოს მხოლოდ იმ აირებით გატანილი სითბო, რომლებიც ქიმიურ რეაქციებში არ მონაწილეობენ; მათი რაოდენობა კი გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ნახშირბადის ჟანგეულებისა.

როგორც ზემოთ უკვე იყო აღნიშნული, ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსი არ შეიძლება შედგეს მატერიალური ბალანსის გარეშე. ასევე, 100 ტ ტევადობის მომუშავე ღუმელისათვის [10] ნაშრომში მოყვანილია მატერიალური და ენერგეტიკული ბალანსების გამარტივებული ანგარიში. ეს ანგარიშები საინტერესოა იმ მხრივ, რომ მოყვანილია ყოფილ საბჭოთა კავშირში დამზადებული ღუმელების მუშაობისათვის დამახასიათებელი თავისებურებანი

150 ტ ტვეადობის ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსები
ჯანგბადის გამოყენებისას და მის გარეშე

	ღუმელის თბოდანაკარგები ჯანგბადის გამოყენებლად	ღუმელის თბოდანაკარგები ჯანგბადის გამოყენებისას
	მგჯ/ტ (%)	მგჯ/ტ (%)
მთლიანად მათ შორის:		
კედლებიდან	481 (100)	569 (100)
თალიდან	84 (17,5)	67 (11,8)
ქველიდან	89 (18,5)	71 (12,5)
გამომავალი აირებით	48 (10,0)	37 (6,5)
გამაცივებელი წყლით	147 (30,5)	367 (64,5)
	113 (23,5)	27* (4,7)

* - გამაცივებელი სისტემა შეიცვალა.

და განსხვავებანი ანგარიშში წინათ გამოყენებულ მაგალითებთან შედარებით. განსხვავება ანგარიშში, რასაკვირველია, პრინციპული არ არის. ისევე იანგარიშება ენერგიის შემოსავალი და გასავალი, მაგრამ ყველა ქვეყანას აქვს თავისთვის დამახასიათებელი კერძო თავისებურებანი, რომლებსაც კონკრეტული ღუმელის ბალანსების შედგენისას ითვალისწინებენ.

მოყვანილ ნაშრომში განხილულია 100 ტ ტვეადობის ღუმელის გამარტივებული მატერიალური და ენერგეტიკული ბალანსი. ღუმელი, ტრანსფორმატორით 50-68 მგვა, ჯართი შექლებისდაგვარად აიღებოდა ერთნაირი. ანგარიში ჩატარებულია 1000 კგ ლითონურ ჯართზე. მიღებული შედეგების მიხედვით ავტორს სურდა განესაზღვრა არა მარტო ენერგიის ხარჯი დნობაზე, არამედ დნობის ხანგრძლივობაც ღუმელის ტრანსფორმატორის სხვადასხვა ხვედრითი სიმძლავრისას.

ჯართისა და თხევადი ფოლადის ქიმიური ანალიზი დნობის სხვადასხვა პერიოდში მოყვანილია ცხრილში 10.4.

ყოველ 1000 კგ ლითონურ ჯართთან ერთად ღუმელში ამატებდნენ 10 კგ კოქსს (85 % C და 6 % SiO₂), 30 კგ კირს (85 % CaO და 2,5 % SiO₂) და 10 კგ სამარტენე აგლომერატს (58 % Fe და 8 % SiO₂). გადნობისას წიდა შეიცავდა: 42 % CaO, 17 % SiO₂, 7,5 % MnO და 17 % Fe ჟანგეულების სახით, რომელშიც FeO-ზე (ანუ Fe⁺²-ზე) მოდიოდა 70 %, ხოლო დანარჩენი 30 % იყო Fe₂O₃ ანუ Fe⁺³.

კაუმიწა (SiO₂) წიდაში ხვდებოდა აგლომერატით (0,8 კგ), კოქსით (0,6 კგ), კირით (0,75 კგ), ლითონური კაზმის სილიციუმით ანუ კაუბადით (5,35 კგ), ჯართის ჭუჭყისაგან (2,5 კგ). მთლიანად

მასალა	C	Mn	Si
ფოლადის ჯართი	0,20	0,50	0,25
თხევადი ფოლადი: გადნობისას	0,60	0,15	-
განჯანგვის წინ	0,40	0,15	-

წიდაში გადავიდა 10,0 კგ კაჟმიწა. აქედან გამოდის, რომ წიდის საერთო რაოდენობა 60 კგ-ია 1 ტ ლითონურ კაზმზე.

გამარტივებული მატერიალური ბალანსი წარმოდგენილია ცხრილში 10.5.

გამარტივებული მატერიალური ბალანსი

შემოვიდა, კგ	Fe	Fe ²⁺	Fe ³⁺	C	Mn	Si
ჯართით	979	-	3,5	2,0	5,0	2,5
კოქსით	-	-	-	8,5	-	-
აგლომერატით	4	1,9	3,8	-	-	-
სულ	979	1,9	7,4	10,5	5,0	2,5
ფოლადში დარჩა	974,1	-	-	6,0	1,5	-
წიდაში გადავიდა	0,9	7,1	3,1	-	3,5	2,5
დაიკარგა აირებით	4,0	-	-	4,5	-	-

რკინის ჟანგულების რაოდენობა წიდაში, გადნობის პერიოდის ბოლოსათვის, დამოკიდებულია ლითონში ნახშირბადის შემცველობასა და ჟანგბადის ხარჯზე და შეიძლება იცვლებოდეს 10-დან 30 %-მდე. თუ ასეთ სქემას მივიღებთ, მაშინ ყველა აუცილებელი შესწორება შეიძლება შევიყვანოთ მატერიალურ ბალანსში.

მატერიალური ბალანსის შედგენისას ავტორს კიდევ ერთი საინტერესო ცნობა მოჰყავს. კერძოდ, ცნობილია, რომ უშუალოდ რკალის ქვეშ მოხვედრილი თხევადი ლითონი, ადგილობრივი ძლიერი გადახურების გამო, ორთქლდება (ზემძლავრი ღუმელების შექმნის საწინააღმდეგოდ გამოთქმულ მოსაზრებებს შორის ერთ-ერთი ძირითადი საკითხი სწორედ რკალების ქვეშ აორთქლებული რკინის დიდი რაოდენობა იყო). შემდგომში რკინის ეს ორთქლი რკალის უშუალოდ მოქმედების ადგილიდან გამოსვლის შემდეგ კონდენსირდება ან გაუმდნარ, შედარებით ცივ ჯართზე, ან, თუ ის არ არის, ღუმელის სხვა ნაწილებზე, რკინის ჟანგულების სახით. რკინის ჟანგულების ნაწილი მტერის სახით მიაქვთ ღუმელიდან გამოსულ აირებს. დადგინდა [59], რომ დანაკარგები რკინის ჟანგულების მტერის სახით არ აღემატება 4 კგ/ტ-ს მაშინაც კი, როცა გამოიყენება აიროვანი ჟანგბადი 5-20 მ³/ტ-ზე ასე რომ, 1 ტ ლითონური ჯართიდან დარჩება 970 კგ თხევადი ლითონი.

დნობის ბოლოს, ნახშირბადიანი ფოლადის გამოდნობისას, განმჟანგველებად ხმარობენ მანგანუმის და კაუბადის შენადნობებს*. განმჟანგველები 15 კგ-ის რაოდენობით ჩაიყრება ციცხეში. მათგან დაიჟანგება და გადაეა წიდაში 1 კგ, 14 კგ კი ლითონში. გადნობისას დაიჟანგება 2 კგ ნახშირბადი. წიდიდან აღდგა 2 კგ რკინა, ხოლო 4 კგ დაიკარგა წიდასთან ერთად. ამრიგად, თხევადი ლითონის გამოსაყალი, მოცემული შემთხვევისათვის (1 ტ ლითონური ჯართისგან), შეადგენს 980 კგ-ს. 1 ტ თხევადი ლითონის მისაღებად დნობის ბოლოსათვის გამოყენებული იყო 1020 კგ ლითონური კაზმი და 15 კგ ფეროშენადნობები – სულ 1035 კგ. თხევადი ლითონის გამოსაყალია

$$\frac{1000\text{კგ}}{1020\text{კგ} + 15\text{კგ}} \cdot 100\% = \frac{1000\text{კგ}}{1035\text{კგ}} \cdot 100\% = 96.6\%$$

თუ გამოყენებული იქნება უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა, მაშინ დანაკარგები ჩამოსხმაზე შეადგენს 2,5–3,5 %. ბოყებში ჩამოსხმისას – 5–6 %. ამრიგად, ნახშირბადიანი ფოლადის გამოდნობისას ვარგისი ლითონის გამოსაყალი შეადგენს 90,5-დან 94,5 %-მდე და დამოკიდებულია არა რკინის აორთქლებაზე ღუმელში, არამედ ლითონის დანაკარგებზე ჩამოსხმისას.

სასარგებლოდ გამოყენებული ენერგია, დახარჯული ლითონისა და წილის გახურებაზე გადნობის პერიოდში, შეადგენს $W_{\text{სა}} = 0,974 \cdot 370 + 0,06 \cdot 525 = 390$ კვტ.სთ, სადაც 370 კვტ.სთ 1 ტ ფოლადის ენთალპიაა, ხოლო 525 კვტ.სთ კი – წილისა, რომელიც ხურდება 25 °C-დან 1550 °C-მდე.

ქიმიური რეაქციების მსვლელობისას გამოყოფილი და შთანთქმული ენერგიების გამოსათვლელად ავტორებს საკუთარი მოსაზრება აქვთ. მათი აზრით, ქიმიური თერმოდინამიკიდან გამომდინარე, სულერთია, როგორ ვიანგარიშებთ მაღალ ტემპერატურაზე ქიმიური რეაქციების მსვლელობისას გამოყოფილ და შთანთქმულ ენერგიებს. შესაძლებელია გამოითვალოს საწყისი ნივთიერებების გახურებისათვის დახარჯული ენერგიების რაოდენობა და შემდეგ იქნეს გამოყენებული ფოლადის მიღების პროცესების ტემპერატურებისას მიმდინარე რეაქციების ენთალპიების მნიშვნელობები. ავტორებს უფრო მოსახერხებლად მიაჩნიათ მეორე გზა: გამოიყუ-

* რედაქტორისაგან: განმჟანგველებად, როგორც წესი, გამოიყენება ფეროშენადნობები, მაგალითად, ფერომანგანუმი, ფეროსილიციუმი, სილიკომანგანუმი. სწორედ ეს უკანასკნელია მანგანუმისა და კაუბადის შენადნობი. იგი დაახლოებით შეიცავს 16...17 % Si, 76 % Mn, დანარჩენია რკინა, ნახშირბადი და სხვ.

ნებული იქნეს ქიმიური რეაქციების პროდუქტების ენთალპიების ცვლილება 25°C -სას (ΔH_{298}°), რადგან ქიმიური რეაქციების პროდუქტების ენთალპიების მომატება უკვე ნაგულისხმევაა ენერგეტიკული ბალანსის გასაველ ნაწილში, $W_{\text{სს}}$ განსაზღვრისას და მის შემოსაველ ნაწილში $W_{\text{კ}}$ -ის განსაზღვრისას.

ცხრილში 10.6. მოყვანილია [60] ქიმიური რეაქციების ენთალპიების სტანდარტული ცვლილება (ΔH_{298}°) 25°C -სას.

მოყვანილი სიდიდეები გადაყვანილია რეაქციაში მონაწილე 1 კგ ნივთიერებაზე ანდა 1 მ³ გამოყენებულ ჟანგბადზე. ქიმიური რეაქციების შედეგად გამოყოფილი ან შთანთქმული ენერგიების ანგარიშისას ავტორებს არ აინტერესებთ ის გზები, რომლებითაც მიმდინარეობს ეს რეაქციები და აინტერესებთ მხოლოდ საბოლოო შედეგები. მაგალითად, თხევადი ლითონის აიროვანი ჟანგბადით დაჟანგვისას ალბათ ჯერ იჟანგება რკინა. თუ წარმოქმნილი რკინის ჟანგეულები ურთიერთქმედებენ თხევად ლითონში გახსნილ ნახშირბადთან, მაშინ რეაქცია შეიძლება წარმოვიდგინოთ. როგორც ლითონში გახსნილი ნახშირბადის ურთიერთქმედება აირო-

ცხრილი 10.6

რეაქციების ენთალპიების სტანდარტული ცვლილები ($-\Delta H_{298}^{\circ}$)

ქიმიური რეაქცია	ენთალპიის ცვლილებები, $-\Delta H_{298}^{\circ}$		
	გადათვლილი	მგჯ	კვტ.სთ
$\text{C}_{\text{Fe}} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_{\text{აირი}}$	1 კგ C	11.1	3.08
	1 მ ³ O ₂	11.9	3.30
$\text{Si}_{\text{Fe}} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$	1 კგ Si	27.0	7.50
	1 კგ SiO ₂	4.5	1.25
$\text{SiO}_2 + 2\text{CaO} = \text{Ca}_2\text{SiO}_4$	1 კგ Si	2.11	0.59
	1 კგ SiO ₂	2.11	0.59
$\text{Mn}_{\text{Fe}} + 0,5 \text{O}_2 = \text{MnO}$	1 კგ Mn	6,99	1,94
$2\text{Cr}_{\text{Fe}} + 1,5 \text{O}_2 = \text{Cr}_2\text{O}_3$	1 კგ Cr	11,0	3,05
$\text{FeO} + \text{C} = \text{CO} + \text{Fe}$	1 კგ Fe	- 2.78	- 0.77
$\text{Fe} + 0,5 \text{O}_2 = \text{FeO}$	1 კგ Fe	4.76	1.32
$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	1 კგ Fe	6.65	1.85
$2\text{Fe} + 1,5 \text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3$	1 კგ Fe	7.36	2.04
$3\text{FeO} + 0,5 \text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	1 კგ Fe	1.89	0.53
$2\text{FeO} + 0,5 \text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3$	1 კგ Fe	32.59	0.72
$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	1 კგ C	32.8	9.11
	1 მ ³ O ₂	19.6	4.88
$\text{C} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}$	1 კგ C	9.2	2.56
	1 მ ³ O ₂	9.86	2.74
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	1 მ ³ O ₂	25.3	7.02
	1 მ ³ CO	12.7	3.51

ვან ჟანგბადთან. ასევე, კოქსის კარბურატორული მიზნებით გამოყენებისას, არ არის საჭირო ნახშირბადის რკინაში გახსნის ენერჯის და მისი ჟანგბადთან ურთიერთქმედების ენერჯის გათვალისწინება. საჭიროა მხოლოდ კოქსის ნახშირბადის დაჟანგვის საბოლოო რეაქციის გათვალისწინება. ავტორები გამოთვლის ასეთ ხერხებზე იმიტომ ამხვილებენ ყურადღებას, რომ ახსნან ის განსხვავებები, რომლებსაც ღებულობენ სხვა მკვლევარები ენერჯიების საერთო ხარჯისა და ღუმელის თბური მ.ქ.კ.-ს განსაზღვრისას. ამ განსხვავების ძირითად მიზეზად ავტორს მიაჩნია არასწორი მიდგომა ნახშირბადის ჟანგვის რეაქციისადმი, რადგან მასზე მოდის დიდი წილი საერთო ქიმიური რეაქციების ენერჯიებში. ენერგეტიკული ბალანსის შედგენისას კი განსხვავებები დიდია - 15-დან 35 %-მდე, ხოლო ღუმელის თბური მ.ქ.კ. კოეფიციენტი იცვლება 65 %-დან 85 %-მდე [61,62,10,63]. ღუმელების სამუშაო არეში გახურებული ელექტროდების არსებობის გამო ნახშირბადის სრული წვა არ მიდის (გამონაკლისად შეიძლება ჩაითვალოს ღუმელის არანორმალური მუშაობა, როცა ღუმელში შეიწოვება დიდი რაოდენობის ქაერი). CO/CO₂ შეფარდება იცვლება 1-დან 3-მდე და ზოგჯერ მეტიცაა.

1 კგ ნახშირბადის დაჟანგვისას CO-მდე, 25 °C-სას სითბოს სახით გამოიყოფა 32,8 მგჯ ენერჯია, ხოლო 1100 °C-სას (ღუმელიდან გამოშვებული აირების ტემპერატურა) - მხოლოდ 28,3 მგჯ, რადგან CO₂-ის ენთალპია იზრდება ამ დროს 4,5 მგჯ-ით, CO-მდე, დაჟანგვისას - შესაბამისად არა 9,2 მგჯ-ით, არამედ 6,34 მგჯ-ით. CO/CO₂ შეფარდებას 1-ის ტოლად თუ მივიღებთ, მაშინ 1 კგ ნახშირბადის დაჟანგვით გამოიყოფა სულ 17,3 მგჯ ენერჯია. შემდგომ ანგარიშებში ავტორი ამ მონაცემებით სარგებლობს. ისე კი, ღუმელიდან გამოტანილი Fe₂O₃-ის ენერჯია 1100 °C-სას, მიღებული 1 კგ რკინის დაჟანგვით, უნდა ავიღოთ 5,87 მგჯ და არა 7,36 მგჯ.

გადნობის პერიოდისათვის W_{კ.რ.}-ის ანგარიშისას, მოცემული საწყისი პირობებისათვის, მხედველობაში უნდა მივიღოთ ენერჯიები, რომლებიც გამოიყოფა კაუბადის (2,5 კგ) და კაზმის მანგანუმის (3,5 კგ) დაჟანგვისას, წიდაში გადასული რკინა (0,9 კგ) და მტვერთან ერთად გატანილი (4,0 კგ) რკინა, კოქსის (4,5 კგ) და ელექტროდების (4,5 კგ) ნახშირბადი, ხოლო წილის წარმოქმნისას - კაუმიწის კალციუმის ჟანგეულებთან ურთიერთქმედების ენერჯია.

10.7 ცხრილის მონაცემებით მიღებულია:
 სინამდვილეში 1 ტ ლითონური კაზმის გადნობაზე დახარჯული ხვედრითი ელექტროენერჯია, ჟანგბადის გამოყენებლად, შეადგენს 410-420 კვტ.სთ/ტ თხევადი ლითონის ტემპერატურისაგან

ქიმიური რეაქციების ენერგეტიკა

ქიმიური რეაქცია	ენერგია	
	მკვ	კვტ-სი
კაუბადის დაჟანგვის	2,5-27,0-67,5	18,9
მანგანუმის დაჟანგვის	3,5-6,99-24,5	6,8
(10,1 კვტ) SiO ₂ -ის აწიდვის	10,1-21,1=21,1	5,9
რკინის დაჟანგვის FeO-მდე	0,9-4,76=4,3	1,2
მტვრისებრი Fe ₂ O ₃ -ის წარმოქმნის	4,0-5,87=23,5	6,5
კოქსის ნახშირბადის დაჟანგვის	4,5-17,3=77,9	21,6
ელექტროდების ნახშირბადის დაჟანგვის	4,5-17,3=77,9	21,6
სულ გამოიყო	296,7	82,5
Fe ₂ O ₃ -ს FeO-მდე აღდგენისას დაიხარჯა	4,3-1,89=-8,1	-2,3
სხვაობა	288,6	80,2

დამოკიდებულებით. 1550 °C-სათვის იღებენ 420 კვტ.სთ/ტ, რაც კარგად ეთანხმება ელექტროენერგიის ფაქტიურ ხარჯს, მიღებულს მსგავს ღუმელებზე ევროპულ ქვეყნებში. სითბოს გამოყენების კოეფიციენტს ანგარიშობენ ტოლობით

$$\eta_{ს.გ} = \frac{W_{ს.გ}}{W_{ელ} \cdot \eta_{ელ} + W_{ქ.გ}}$$

საიდანაც $W_{ს.გ} - \eta_{ს.გ} W_{ქ.გ} = W_{ელ} \cdot \eta_{ელ} \cdot \eta_{ს.გ} = W_{ქ.გ}$ პროცესზე დახარჯული ენერგიის $W_{ქ.გ}$ შეფარდებას ფაქტობრივად დახარჯულ ელექტროენერგიაზე $W_{ელ}$ უწოდებენ ენერგიის გამოყენების საერთო კოეფიციენტს $\eta_{საერთო} = \eta_{ელ} \cdot \eta_{ს.გ}$. თუ გადნობის პერიოდისათვის მივი-

ღებთ $\eta_{ელ} = 0,94$ მაშინ $\eta_{ს.გ} = \frac{390}{80,2 + 420 \cdot 0,94} = 0,82$. აქედან გადნობის პერიოდის პროცესში ენერგიის ხარჯი იქნება

$$W'_{ქ.გ} = W'_{ელ} \cdot \eta'_{ს.გ} = 420 \cdot 0,94 \cdot 0,82 = 324 \text{ კვტ.სთ/ტ.}$$

გადნობის პერიოდის მიახლოებითი ენერგეტიკული ბალანსი 1 ტ ლითონური კაზმისათვის იქნება

შემოსავალი,	კვტ.სთ (%)	გასავალი,	კვტ.სთ (%)
ელექტროენერგია	420 (82,8)	ლითონისა და წიდის გადნობა	390 (78,0)
ქიმიური რეაქციები	80,2 (16,2)	ელექტრული დანაკარგები	25,52 (5,20)
		თბური დანაკარგები	85,0 (17,0)
სულ	500,2 (100)	სულ	500,2 (100)

სასარგებლოდ გამოყენებული ენერგია გადნობის პერიოდის შედეგ იხარჯება თხევადი ლითონისა და წიდის, აგრეთვე ღუ-

მელში მიცემული წილის წარმოქმნელებისა და ფეროშენადნობების გასახურებლად. განხილული შემთხვევისას წილა ღუმელში არ შეუცვლიათ, მხოლოდ გაანახევრეს, ე.ი. 30 კგ 1 ტ თხევად ლითონზე. რადგან წილის ფუძიანობა გადნობის ბოლოსათვის იყო 2,5, ამიტომ ღუმელში არც კირი დაუმატებიათ. რკინის უანგეულების რაოდენობა წილაში გადნობის პერიოდის ბოლოსთვის შემცირდა 17-დან 10 %-მდე FeO-ს და Fe₂O₃-ის იგივე თანაფარდობის დაცვით. ამასთან, წიდიდან აღდგა 2,1 კგ რკინა.

1 ტ თხევადი ლითონის და 0,03 ტ წილის გასახურებლად 1550 °C-დან 1670 °C-მდე (ჩამოსხმა ხდებოდა უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე) სასარგებლოდ იქნა დახარჯული ენერგიის შემდეგი რაოდენობა:

$W''_{სა} = (1670 - 1550) \cdot (0,79 - 0,03 \cdot 1,05) = 91,02$ მგჯ ანუ 25,3 კვტ.სთ, სადაც 0,79 და 1,05 – შესაბამისად ფოლადის და წილის კუთრი თბოტევადობებია (მგჯ/ტ·°C).

ლითონში გახსნილი 2 კგ ნახშირბადის დაუანგვისას გამოიყო 3,7 მ³ CO, რომლის ნახევარიც (ზემოთ მივიღეთ, რომ გამავალ აირებში CO/CO₂=1) იუანგება CO₂-მდე. ასევე იუანგება ელექტროდების 1 კგ ნახშირბადიც. რადგან გამომავალი აირების საშუალო ტემპერატურა აღწევს 1600 °C-ს, CO-სა და CO₂-ის ენთალპიები, შესაბამისად 2,32 მგჯ/მ³ და 3,73 მგჯ/მ³, უნდა გამოაკლდეს ცხრ.10.7-ში მოყვანილ მონაცემებს.

მოყვანილი შემთხვევისათვის ქიმიური რეაქციებისას გამოყოფილი და შთანთქმული ენერგია $W''_{ქ.}$ შეიძლება წარმოვიდგინოთ 10.8 ცხრილის სახით.

ცხრილი 10.8

ქიმიური რეაქციებისას გამოყოფილი და შთანთქმული ენერგია

გამოიყო:	მგჯ	კვტ.სთ
C-ს დაუანგვა ლითონიდან CO-მდე	2·11,1=22,2	6,1
50% CO-ს დაუანგვით CO ₂ -მდე	1,85·12,7=23,5	6,5
CO-ს ენთალპიის გამოკლებით	1,85·2,32=-4,3	-1,2
CO ₂ -ის ენთალპიის გამოკლებით	1,85·3,73=-6,9	-1,9
სულ	34,5	9,5
ელექტროდების დაუანგვისას გამოიყო	$1 \cdot \frac{25,8 \cdot 4,9}{2} = 15,4$	4,3
დახარჯულია:		
წილის Fe ₂ O ₃ -ის აღდგენაზე	0,63·7,36=-4,6	-1,3
წიდიდან FeO-ს აღდგენაზე	1,47·4,76=-7,0	-1,9
2,1 კგ აღდგენილი რკინის ენთალპიის ცვლილება	-2,9	-0,8
სხვაობით მივიღებთ	35,4	9,8

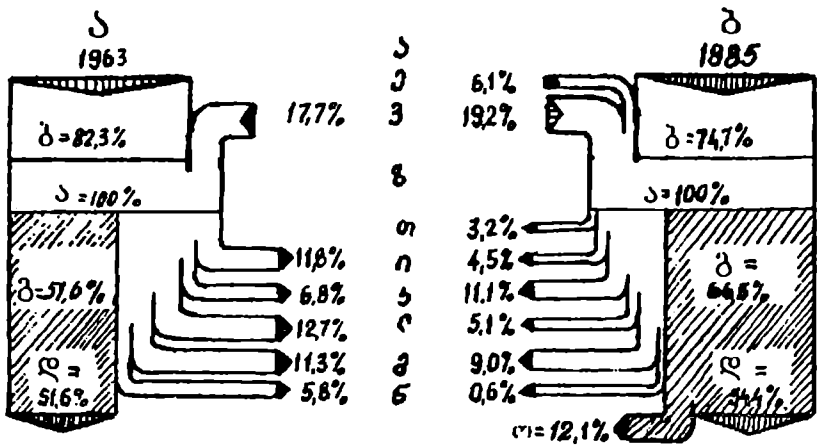
100 ტ ტვეადობის ზემძღაერი ღუმელისათვის ელექტრო-
 ენერჯის ხვედრითი ხარჯი 1 ტ თხევად ლითონზე, ადებული
 ტექნოლოგიისათვის, საშუალოდ არის 500 კვტ.სთ. გადნობის
 პერიოდში 1 ტ ლითონურ ჯართზე დახარჯული იყო 420 კვტ.სთ,
 ხოლო 1 ტ თხევად ლითონზე გადათელით – 420·0,98=429 კვტ.სთ.
 თუ ჩავთვლით, რომ ღუმელის ელექტრული მ.კ.კ. გადნობის შემდეგ
 არის 0,9-ს, მაშინ თბური ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი ამ

$$\text{პერიოდისათვის იქნება } \eta_{\text{ს.გ.}}^{\text{//}} = \frac{25,3}{9,8 + (500 - 429)0,9} = 0,34, \text{ ხოლო}$$

პროცესზე დახარჯული ენერჯია – 25,3–0,34·9,8=22,0 კვტ.სთ. 1 ტ
 თხევადი ლითონის გამოდნობაზე დახარჯული ენერჯია იქნება
 324·0,97+22=336 კვტ.სთ.

ამრიგად, ჩვენ გაეცანით ზემძღაერი ღუმელის ენერგეტი-
 კული ბალანსის ანგარიშის რამდენიმე ხერხს. ამ ხერხების განსხ-
 ვავება ერთმანეთისაგან გამოიხატება მხოლოდ იმაში, რომ პირველ
 შემთხვევაში ბალანსი შედგენილი იყო უკვე მოქმედი ღუმელისა-
 თვის, მეორე შემთხვევაში – დასაპროექტებელი ღუმელისათვის.
 მესამეში – გამარტივებული ბალანსი ყოფილ საბჭოთა კავშირში
 არსებული 110 ტ ტვეადობის ღუმელისათვის. თუ მონაცემებს
 შევადარებთ, დავინახავთ, რომ განსხვავება დიდი არ არის. ამიტომ
 დაახლოებით შესაძლებელია სარწმუნოდ მივიღოთ ამ მაგალითებ-
 ში მოყვანილი ენერჯიების ხარჯი 1 ტ თხევად ლითონზე. უნდა
 აღინიშნოს, რომ ღუმელის ენერგეტიკული ბალანსის გამოყვანის
 ხერხები და მაგალითები მრავალია და ისინი თითქმის ემთხვევა
 ერთმანეთს, მიუხედავად რამდენიმე პრინციპული განსხვავე-
 ბისა.

როგორც უკვე ზემოთ იყო აღნიშნული. ენერგეტიკული ბალა-
 ნსის გამოყვანა თვითმიზანი არ არის, არამედ საშუალებაა გამოი-
 ნახოს გზა ფოლადის მიღებაზე გაწეული ენერჯის ხარჯის
 შესამცირებლად. მით უმეტეს, რომ თანამედროვე ზემძღაერი
 ღუმელი თავისი მუშაობისას მოითხოვს ძალიან დიდი ენერჯის
 ხარჯს (სურ. 10.11).



სურ. 10.11. 80 ტ (ა, 1063 წ) და 115 ტ (ბ, 1985 წ) ტევეადობის რკალური ღუმელების ენერგეტიკული ბალანსების შედარება: ა - მიყვანილი ენერგია; ბ - ელექტროენერგია; გ - სასარგებლო ენერგია; დ - ფოლადი; ე - აირ-ჟანგბადის სანთურები; ვ - ეგზოთერმული რეაქციები; ზ - დანაკარგები; თ - ენდოთერმული რეაქცია; ი - დანაკარგები გამოსხვიებით და ზედაპირიდან; კ - გამავალი აირები; ლ - ტრანსფორმატორი; მ - წიდა; ნ - გამაცივებელი წყალი; ო - გამაცივებელი წყლის სითბოს გამოყენება.

10.2.2. ზემძლავრი რკალური ღუმელების განვითარების საფეხურები

ელექტროფოლადსადნობი რკალური ღუმელების მუშაობის მთელი ხნის მანძილზე მიმდინარეობდა საფუძვლიანი გამოკვლევები მათი წარმადობის გაზრდის მიზნით. მიღებული „კლასიკური“ ტექნოლოგია - ლევირებული და სპეციალური დანიშნულების ფოლადებისა და შენადნობების გამოდნობა მიზანშეწონილს ხდიდა ღუმელების ტევეადობის გაზრდას რაღაც გარკვეულ ზღვრამდე. მხოლოდ მას შემდეგ, რაც რკალურ ღუმელებში დაიწყო სვეულეებრივი ხარისხის ფოლადის გამოდნობა და დაასაბუთეს ღუმელებში შეყვანილი სიმძლავრის გაზრდის შესაძლებლობა (იხ. თავი V. ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები), იმატა ღუმელის ტევეადობამაც. თავდაპირველად ღუმელის წარმადობის გაზრდის მიზნით, მძლავრი ტრანსფორმატორების შექმნამდე, სცადეს ექვსელექტროდიანი, ორტრანსფორმატორიანი ღუმელების ამუშავება. ამ მიზნით

შეიქმნა ღუმელი 90 ტ ტევადობით (მაშინდელი თვალსაზრისით დიდი ტევადობის ღუმელი). მიუხედავად იმისა, რომ ასეთ ღუმელს საკმაოდ ბევრი დადებითი მხარე ჰქონდა (ტრანსფორმატორების დაბალი სიმძლავრე, შედარებით მცირე მეორადი ძაბვა, ელექტროდების მცირე დიამეტრი და სხვ.), მათი ტევადობის გაზრდა ტრანსფორმატორების სიმძლავრის პარალელურად ხდებოდა. ამრიგად, შეიქმნა სამფაზიანი მრგვალი (ექვსეულექტროდიანი ღუმელი ოვალური ფორმისა იყო), დიდი ტევადობის ზემძლავრი ღუმელები. გამოთქმა „ზემძლავრი“ არ უნდა აეუროთ დიდ ტევადობაში. ზემძლავრი ნიშნავს, რომ 1 ტ ფოლადზე მოსული სიმძლავრეა 400-დან 1000 კვ.ა. ამრიგად, შეიძლება ღუმელის ტევადობა იყოს 200 ტ, მაგრამ არ ითვლებოდა ზემძლავრად, თუ 1 ტ ლითონზე მოდის მცირე სიმძლავრე, და პირიქით, შეიძლება 60 ტ ტევადობის ღუმელი იყოს ზემძლავრი, თუ 1 ტ ლითონზე მოდის დიდი სიმძლავრე.

ზემძლავრი ღუმელების ტევადობა დამოკიდებულია სხვადასხვა ქვეყნის ენერგეტიკული რესურსების დონეზე. მაგალითად, აშშ-ში მუშაობს ყველაზე დიდი ღუმელები 360-375 ტ ტევადობით და ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 160 მგვ.ა. აქვე აგებული იყო 720 ტ ტევადობის ღუმელი, მაგრამ ტექნიკური პირობების გამო მუშაობს 375 ტ კაზმის გამოდნობაზე. ასეთი ტევადობის ზემძლავრი ღუმელები ერთეულებია. აშშ-ში უფრო გავრცელებულია 180-200 ტ ტევადობის ღუმელები. დასავლეთ ევროპის ქვეყნებში უმთავრესად 90-120 ტ ტევადობის ღუმელებს ამუშავებენ, ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 63-90 მგვ.ა, იაპონიაში კი - 80-100 ტ ტევადობის ღუმელებს ტრანსფორმატორის იმავე სიმძლავრეებით. საერთოდ, რკალური ღუმელების ტევადობის მომატება არ იწვევს წარმადობის ისეთივე ზრდას, როგორც ეს მარტენის ღუმელების და განსაკუთრებით, კონვერტერების შემთხვევაში ხდება. მაგალითად, მარტენის ღუმელის ტევადობის გაზრდა 600-800 ტ-მდე იწვევს ღუმელის წარმადობის გაზრდას 50-60 %-ით. ჟანგბად-კონვერტერის წარმადობა მისი ტევადობის პირდაპირპროპორციულია. რკალური ღუმელის შემთხვევაში კი სხვა სურათია. მაგალითად, 360 ტ ტევადობის ღუმელში მხოლოდ ორჯერ უფრო მეტი ფოლადი დნება, ვიდრე კარგად მომუშავე 100 ტ ტევადობის ღუმელში. ამის მიზეზად ასახელებენ ტრანსფორმატორის დაბალ ხვედრით ნომინალურ სიმძლავრეს, რაც თავის მხრივ დამოკიდებულია ელექტროდების ხარისხზე: თანამედროვე ელექტროდები მუშაობენ მხოლოდ 80-100 კა დენის ძალაზე.

რუსეთში გამოშვებული ელექტროდუმელების ტევადობები იცვლება 0,5 ტ-დან 200 ტ-მდე. ზემოქლავრი ღუმელები რუსეთში ძირითადად 100 ტ ტევადობისაა (ДСП-100Н3А, ДСП-100Л6), ტრანსფორმატორის სიმძლავრეა 70-90 მგვ.ა.

რუსეთის საზღვრებს გარეთ ღუმელის 'ზომების ძირითად მაჩვენებლად ითვლება არა ტევადობა, არამედ ღუმელის გარსაცმის შიდა დიამეტრი. ამ დიამეტრით განისაზღვრება ღუმელის ტევადობა მცირე გადახრებით. ასეთი მიდგომა ღუმელის ზომებისადმი გამოწვეულია შემკვეთი ფირმების უამრავი განსხვავებული მოთხოვნის და ამიტომ დამამზადებლებს უფრო უადვილდებათ ღუმელების კლასიფიკაცია გარსაცმის შიდა დიამეტრით. ღუმელის ტევადობაში მცირე ცვლილებების შეტანა კი შეუძლიათ თვითონ მომხმარებლებს ამონაგის სისქის შეცვლით. ცხრილებში 10.9 და 10.10 მოყვანილია აშშ-სა და გურ-ში გამოშვებული რკალური ღუმელების ზომები.

რკალური ღუმელისათვის გარსაცმის დიამეტრით შეიძლება განისაზღვროს კიდევ ერთი მეტად მნიშვნელოვანი მაჩვენებელი

ცხრილი 10.9

ამერიკული ზემოქლავრი ღუმელების ძირითადი პარამეტრები [64]

ღუმელის შიდა დიამეტრი, მ		ღუმელის ტევადობა, ტ.	ქვედის ფართობი, მ ²	ელექტროდები, მმ	
გარსაცმის დონეზე	ამონაგის დონეზე			დიამეტრი, მმ	განშლა, მმ
4,47	3,88	50	11,8	457	1067
5,18	4,49	72,5	15,9	508	1295
6,10	5,41	109	23	508	1295
6,70	6,01	150	28,4	610	1600
7,62	6,93	200	37,7	610	1600
9,14	8,45	318	56	711	1750
11,58	10,89	725	93,1	711	1750

ცხრილი 10.10

გურ-ის ერთ-ერთი ფირმის რკალური ღუმელების პარამეტრები

ღუმელის მარკა	გარსაცმის დიამეტრი, მ	ტევადობა, ტ	ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე, მგვ.ა
490	4,9	44-57	30-36
520	5,2	56-68	35-42
550	5,5	64-82	40-48
580	5,8	74-96	45-54
610	6,1	90-112	52,5-63
640	6,4	104-130	62,5-75
670	6,7	120-148	72-86

– ღუმელის ქვედის ფართობი სამუშაო ფანჯრის ზღურბლის დონეზე. მისი საშუალებით იგებენ ტრანსფორმატორის ხვედრით ნომინალურ სიმძლავრეს კვ.ა-ში, მოსულს ღუმელის ერთეულ ფართობზე და რკალების გამოსხივებას კედლების ამონაგზე. ფირმა „ელექტრომელტის“ რეკომენდაციით ეს მაჩვენებლები 50-დან 320 ტ ტევადობის ზემძლავრი ღუმელებისათვის უნდა იყოს 2150 კვ.ა/მ² ან ნაკლები.

10.2.2.1. ზემძლავრი რკალური ღუმელების თანამედროვე მდგომარეობა და მათი განვითარების მიმართულებები

მიუხედავად იმისა, რომ მსოფლიოს უმეტეს ქვეყნებში ფოლადსადნობი საწარმოებისათვის ფულადი დახმარება შეზღუდულია, რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა იზრდება როგორც აბსოლუტურ, ისე პროცენტულ გამოხატულებებში, მთლიანად გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობასთან შედარებით. ამის მიზეზად მიიჩნევენ რკალურ ღუმელებში მიმდინარე პროცესების მოქნილობას და დახარჯული კაპიტალური დაბანდებების სიმცირეს სხვა პროცესებთან შედარებით. მაგალითად, 90 ქვეყნიდან, რომლებსაც დღეს ფოლადის დნობის საშუალება აქვთ, მესამედი ისეთია, რომლებმაც ამ საქმეს 60-იანი წლების შემდეგ მოჰკიდეს ხელი. ფოლადის თიხაქმის ყველა ახალი მწარმოებელი ქვეყანა გამოიყენებს ტექნოლოგიურ ხაზს „ჯართი ან პირდაპირი აღდგენის რკინა – რკალური ღუმელები“. ამ მიმართულებას ძალიან უწყობს ხელს თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელის წარმადობის გაზრდის მრავალი შესაძლებლობა.

სხვადასხვა ქვეყანაში ამჟამადაც მიმდინარეობს მოქმედი რკალურის ღუმელების ტექნოლოგიური და ტექნიკური მხარეების დახვეწა და ახალი რკალური ღუმელების ათვისება. ბოლო ხანებში რკალური ღუმელები ძირითადად გამოიყენება მხოლოდ გამდნობ აგრეგატებად. ლითონის დამუშავება ხდება ღუმელსგარე დანადგარებში, რომლებიც რკალურ ღუმელთან ერთად ერთ კომპლექსს წარმოადგენენ.

10.2.2.2. თანამედროვე ზემოქმედების ღუმელები

ელექტროფოლადსადნობი წარმოების განვითარება დამოკიდებულია რკალურ ღუმელებში ფურცლოვანი ფოლადის გამოდნობაზე უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე თხელი სლაბების ჩამოსხმის ათვისებით. თანამედროვე ზემოქმედების, წყლით საცივებელი რკალური ღუმელები თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებით [65] წარმოადგენენ მაღალმწარმოებლურ დანადგარებს. 145 ტ ტევადობის რკალური ღუმელი 100 მგვ.ა ტრანსფორმატორის სიმძლავრით (ფირმა Chapparral აშშ) კაზმს ადნობს 1,5 საათში, ელექტროენერგიის ხარჯით 480 კვტ.სთ/ტ. ღუმელსგარე დამუშავებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ღუმელის წიდის ციცხვში მოხვედრის თავიდან აცილებას; ამისათვის გამოიყენებენ ხერხეულ ღუმელს გაკეთებული აქვს შიბერული საკეტი. სხვა ფირმის ღუმელები (გფრ, დანია) ამ მიზნით იყენებენ ლითონის ექსცენტრულ გამოშვებას ღუმელიდან, თხევადი ფოლადის ნაწილის ღუმელში დატოვებით. იაპონიაში 66 ტ ტევადობის რკალურ ღუმელში ხდება ლითონური ჯართის გახურება გამოიყენება აირებით. ამის შედეგად ელექტროენერგიის ხარჯი შემცირდა 43 კვტ.სთ/ტ-ით, წარმადობა გაიზარდა 8 %-ით და შემცირდა ელექტროდების ხარჯი. შედეგში ფირმა „Aresla“ ამუშავებს 50 ტ ტევადობის მუდმივი დენის რკალურ ღუმელს, ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 80 მგვ.ა. ელექტროდების ხარჯი ამ ღუმელზე შეადგენს 2 კვტ-ზე.

ფოლადსადნობი წარმოება მსოფლიოში ხასიათდება არა მარტო მარტენის ღუმელების გაუქმებით, არამედ ზოგჯერ ჟანგბადის კონვერტირების გაჩერებითაც და ახალი ზემოქმედების რკალური ღუმელების ამოქმედებით [66]. როგორც ამ ნაშრომიდან ჩანს, ახალი რკალური ღუმელები ადჭურვილნი არიან მძლავრი საცივებელი საღუმელე ტრანსფორმატორებით, საცივებელი კამართა და ღუმელის კედლების პანელებით, სათბობ-ჟანგბადის სანთურებით. ღუმელებზე გამოიყენება ფრაგმენტირებული (დანაჭროვნებული) ლითონური კაზმის უწყვეტი ჩატვირთვა. თანდათანობით რკალური ღუმელები გადაიქცევენ მხოლოდ გამდნობ დანადგარებად. თხევადი ლითონის დამუშავება ხდება ციცხვში. ერთ-ერთ ძირითად პრობლემად ელექტროფოლადსადნობი წარმოებისათვის რჩება ლითონური კაზმის ხარისხი ე. წ. მეორადი ლითონების გამო. ლითონური კაზმის შემცველელად შეიძლება ჩაითვალოს მეტალიზებული გუნდები, ეს კი დაკავშირებულია დამატებით ენერგეტიკულ ხარჯებთან. ამიტომ, ენერგეტიკული თვალსაზრისით, დაწვრილებით უნდა იყოს შესწავლილი და შედარებული

ორი სქემა: 1. ბრძმედი-ჟანგბადის კონვერტერი; 2. რკინის პირდაპირი მიღების დანადგარი-რკალური ღუმელი.

რკალური ღუმელების მუშაობის მანევრებლები ძალიან სწრაფად იცვლება - ამის მიზეზია ახალი ტექნიკისა და ტექნოლოგიების დანერგვა წარმოებაში. 1983 წლისათვის რკალური ღუმელებისათვის დამახასიათებელი იყო: წარმადობა 30,5 ტ/სო, ელექტროენერჯიის ხვედრითი ხარჯი 440 კვტ.სთ/ტ-ზე; ჟანგბადის ხარჯი 25 მ³/ტ-ზე. მაგრამ ეს მონაცემები უკვე რამდენიმე წლის შედეგ შეიცვალა [67].

ნაშრომში [68] აღწერილია 115 ტ ტვეადობის რკალური ღუმელების მუშაობისას მიღწეული შედეგები. წელიწადში 200000 ტ მსხვილი ფურცლისა და სპეციალური დანიშნულების მაღალლეგირებული ფოლადის ნაჭედების მწარმოებელ ქარხანაში Campi (ჯგუფიდან Nueva Italsider) მარტენის ღუმელების მაგივრად შექმნეს ახალი ფოლადსადნობი საამქრო, აღჭურვილი ფოლადსადნობი რკალური ღუმელით, სინთეზური წიღის სადნობი რკალური ღუმელით, პორციული ვაკუუმირების დანადგარით. 300 ტ ტვეადობის ელექტროწიღური ღუმელით, Ca-Si-ის და Ca-Si-Ba-ის შენადნობების ინჟექციის (შებერვის) მანქანით. 1980 წლიდან 1983 წლამდე წარმადობა გაიზარდა 25-დან 40 ტ/სთ-მდე, ამასთან, ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი შემცირდა 4,5-7-დან 0,2-1,3 კვტ-მდე, ხოლო ელექტროდებისა კი - 6,2-დან 4,8 კვტ-მდე.

წარსულში რკალური ღუმელები გამოიყენებოდა მხოლოდ მაღალლეგირებული და სპეციალური დანიშნულების ფოლადებისა და შენადნობების გამოსადნობად. ამჟამად [69] მათში გამოიღნობა ყველა დანიშნულების და მათ შორის, რიგითი ნახშირბადიანი ფოლადებიც. კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური გაუმჯობესების შედეგად დნობა თანამედროვე ზემძლავრ ღუმელებში შეიძლება დასრულდეს 1 საათში. ამას ხელს უწყობს ლითონის ღუმელსგარე დამუშავება, რასაც თან სდევს ხვედრითი კაპიტალური ხარჯების მკვეთრი შემცირება. მაგალითად, თანამედროვე ღუმელების მუშაობისას (აშშ) ლითონურ ჯართზე აღნიშნული ხარჯები წელიწადში საშუალოდ შეადგენს 85 დოლ/ტ, მაშინ როცა, „ბრძმედი-კონვერტერის“ სქემისას - ~260 დოლ/ტ. ასეთი განსხვავება ხვედრით კაპიტალურ დაბანდებაში არ არის საბოლოო - იგი კიდევ შეიძლება გაიზარდოს. ამ გარემოებამ არ უნდა გვაფიქრებინოს, თითქოს ბრძმედისა და კონვერტერის მუშაობის გაუმჯობესებაზე არაფერ ფიქრობდეს. სამუშაოები, და თანაც ძირფესვიანი, ამ მიმართულებითაც მიდის, რაზედაც მეტყველებს თანამედროვე ბრძმედების, და კონვერტერების მუშაობაში მიღ-

წეული წარმატებები. მაგრამ, როგორც მკვლევარები ფიქრობენ, თუ კონვერტერის და განსაკუთრებით ბრძმედის მუშაობის გაუმჯობესების ხერხები თანდათან მცირდება, რკალური ღუმელების მუშაობის გაუმჯობესებისათვის ჯერ კიდევ ბევრი ცდაა ჩასატარებელი.

ერთ-ერთი ასეთი მიმართულებაა ღუმელის კაზმის გამოყენების გაუმჯობესება ენერგეტიკული ხარჯების უმცირესი გაზრდით. ნაშრომში [70] მოკლედ არის განხილული კაზმის ჩატვირთვის, ღუმელის ელექტრული, გეომეტრიული და მექანიკური მახასიათებლები. ნაჩვენებია, რომ ღრუბლოვანი რკინის უწყვეტი ჩატვირთვა და ღუმელში წინა დნობის მცირე რაოდენობის თხევადი ლითონის ჩატოვება (~30 %) საშუალებას იძლევა შივადწიოთ საუკეთესო ტექნიკურ-ეკონომიკურ მანევრებლებს. აღნიშნულია, რომ ტრადიციულ რკალურ ღუმელებთან შედარებით, ღრუბლოვან რკინაზე მომუშავე ღუმელები (ერთნაირი ტევადობისას) უნდა იყვნენ უფრო დაბლები, მაგრამ მეტი დიამეტრის. ამასთან, ღუმელებს უნდა ჰქონდეთ წყლით საცივებელი კედლები და კამარა. აღნიშნულია აგრეთვე, რომ სიმაღლის შემცირება ხელს უწყობს მივიღოთ რკალის უფრო მძლავრი გამოსხივება და აბაზანის უფრო ძლიერი არევა შედარებით დაბალი ძაბვისას.

ნაშრომში [71] მოყვანილია ლაბორატორიულ ღუმელში (ტევადობა 120 კგ, ღუმელის დიამეტრი - 660 მმ, ელექტროდის დიამეტრი - 63 მმ, ტრანსფორმატორის სიმძლავრე - 200 კვ.ა, ქრომომაგნეზიტის ამონაგი) ჩატარებული სამუშაოების შედეგები. ცდების მიზანს წარმოადგენდა ღუმელში ღრუბლოვანი რკინის ჩატვირთვის ხერხების გავლენის შესწავლა დნობის მანევრებლებზე. ღუმელში ღრუბლოვანი რკინის ჩატვირთვა ხორციელდებოდა: 1. შეკუმშული ჰაერით გუნდების შეტყორცნით ელექტროდების ქვეშ; 2. უწყვეტად, თაღში არსებული ხვრელიდან; 3. ჩასატვირთი კალათით თაღში არსებული ხვრელიდან. ღრუბლოვანი რკინის ჩატვირთვისას ღუმელი ჩართული უნდა იყოს. ცდების ერთი ნაწილი მიმდინარეობდა წიღის ფუძიანობის ცვლილებით (კირის დამატებით) ნახშირბადის ჟანგბადთან შეფარდების მუდმივობისას. ღრუბლოვანი რკინისათვის ეს შეფარდება 1-ის ტოლია. ცდების მეორე ნაწილი მიმდინარეობდა მუდმივი ფუძიანობისას. ნახშირბადისა და ჟანგბადის შეფარდების შეცვლა ხდებოდა ნახშირისა და რკინის მადნის დამატებით. დნობა მიმდინარეობდა შემდეგნაირად: ქვედა ტვირთავდნენ 40 კგ ღრუბლოვან რკინას. ჩართავდნენ ღუმელს, ღრუბლოვანი რკინის მთლიანად გადნობის შემდეგ აბაზანას ასურებდნენ 1680°C-მდე წიღის ფუძიანობის გაზრდა

1-დან (კირის ხარჯი 17 კვ/ტ ღრუბლოვან რკინაზე) 2,5-მდე (კირის ხარჯი 45,5 კვ/ტ) იწვევდა ელექტროენერჯიის ხარჯის გაზრდას 4,9 კვტ.სთ/ტ ღრუბლოვან რკინაზე მისი ღუმელში მიწოდების ხერხისაგან დამოუკიდებლად. წიდის ფუძიანობის მუდმივობისას, ღრუბლოვანი რკინის შეტყორცნისას რკალის ქვეშ, ელექტროენერჯიის ხარჯი 90 კვტ.სთ/ტ-ით უფრო ნაკლებია, ვიდრე ღრუბლოვანი რკინის უწყვეტი ჩატვირთვისას და 80 კვტ.სთ/ტ-ით ნაკლები, ვიდრე კალათით ჩატვირთვისას. ნახშირბადის ჟანგბადთან შეფარდების გაზრდა ასევე ამცირებს ელექტროენერჯიის ხარჯს. ელექტროენერჯიის ხარჯის შემცირება აიხსნება რკალის ენერჯიის უფრო სრული ათვისებით გუნდების გადნობისას რკალის მიდამოებში.

რკალური ღუმელის კაზმში ღრუბლოვანი რკინის გამოყენების ეკონომიკური და ტექნოლოგიური ანალიზი [72] გვიჩვენებს, რომ მისი სისუფთავე მინარეკებისაგან უზრუნველყოფს ფოლადის მიღებას ფერადი ლითონების ძალიან მცირე შემცველობით. აზოტის შემცველობა შეიძლება შევამციროთ 0,2-დან 0,006 %-მდე. განხილულია ღრუბლოვანი რკინის გამოდნობის სხვადასხვა პროცესი. სამუშაოს ავტორები ასკენიან, რომ ყველაზე ხელსაყრელია

უწყვეტი ჩატვირთვა $33 \frac{\text{კბ}}{\text{ტ.ვტ.წთ}}$ ჩატვირთვის სიჩქარით. ღრუბლოვანი რკინის მეტალიზაციის ხარისხი უნდა იყოს 90 %-ზე მეტი. ფოლადის განჟანგვა ამ დროს არ განსხვავდება ჯართზე დნობის პროცესისაგან, მაგრამ დნობის პროცესის ყველა ოპერაცია უნდა მოწმდებოდეს. ოპტიმალური ტექნოლოგიის, ღუმელის კონსტრუქციისა და მუშაობის ორგანიზაციის შერჩევით, ავტორების აზრით, შეიძლება უფრო დიდი წარმადობის მიღწევა ელექტროდებისა და ელექტროენერჯიის უფრო ნაკლები ხარჯისას, ვიდრე ლითონურ კაზმზე მუშაობით. შემდგომში ნაეარაუდევია ღრუბლოვანი რკინის დნობისას გამოყენებული იქნეს ყველა მიღწევა, რომელსაც ახორციელებენ ლითონური კაზმის რკალურ ღუმელში დნობისას.

რკალურ ღუმელში ჯართისა და მეტალიზირებული ნედლეულის დნობის ტექნოლოგიური განსხვავების განხილვისას [73] ნაშრომის ავტორები ანალიზის საშუალებით მიდიან დასკვნამდე, რომ თბური ბალანსის თვალსაზრისით უფრო ხელსაყრელია კაზმში ერთდროულად ლითონური ჯართისა და მეტალიზირებული ნედლეულის გამოყენება.

საერთოდ, თანამედროვე ზემდღაერი რკალური ღუმელებისათვის გამოიყენება სამი, სახის კაზმი: 100 % მეტალიზირებული

ნედლეული; ლითონური ჯართისა და მეტალიზირებული ნედლეულის ნარევი; 100 % ლითონური ჯართი. მაღალხარისხოვანი ლითონის მისაღებად და დნობის დასაჩქარებლად კაზმს წაეყენება მრავალი მოთხოვნა: არასასურველი მინარევების სიმცირე; დანატროვნების ზღვრული ზომები; ნაყარის მასა; კაზმის შემადგენელი სხვადასხვა ზომისა და დანიშნულების ნაწილების ჩატვირთვის თანმიმდევრობა; კაზმის შემადგენელი ნაწილების განსაზღვრა და სხვ.

თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელების მუშაობის გასაუმჯობესებლად, რასაკვირველია, მარტო კაზმის საკითხის გადაწყვეტა არ კმარა. კიდევ მრავალი სხვა მიზეზიც არსებობს. რომლებიც ხელს უწყობს ღუმელის წარმადობის გაზრდას და მისი ენერგეტიკული რეჟიმის გაუმჯობესებას; სწორედ ამ მრავალი მიზეზის გამოა, რომ რკალური ღუმელის მუშაობის დახვეწა ჯერ არ დამთავრებულა და მას დიდი მომავალი აქვს. ბოლო ათი წლის განმავლობაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ზემძლავრი ტრანსფორმატორების მუშაობის გაუმჯობესებას; ღუმელის საცივებელი ნაწილების კონსტრუქციების დახვეწას და სხვადასხვა გამაცივებელი მასალის გამოყენებას; ჟანგბადის, აირის გამოყენების რაციონალურ ხერხებს; თხევადი ლითონის ღუმელს-გარე დამუშავების ხერხებს; ნახშირბადის შემცველი ფხვნილისებრი ნარევის შექმნას და ა.შ. ამჟამად არსებობს ყველა შესაძლებლობა იმისა, რომ ელექტროენერჯის ხარჯი 1 ტ გამოდნობილ ლითონზე შეადგენდეს 400 კვტ.სთ., ხოლო გადნობის პერიოდი შემცირდეს 40 წუთამდე. უკანასკნელი გამოგონებების პრაქტიკაში დანერგვაზე დაყრდნობით მრავალი მოწინავე ქვეყანა მუშაობს თანამედროვე ტექნოლოგიური ხაზით: „რკალური ღუმელი – ციცხე ღუმელი – ვაკუუმური დანადგარი – უწყვეტი ჩამოსხმა“.

ჟანგბად-აირის სანთურების გამოყენება იძლევა ელექტროენერჯის ეკონომიას და ზრდის ღუმელის საათობრივ წარმადობას. მაგალითად, აირის 4,3 მ³/ტ ხარჯისას იზოგება 38 კვტ.სთ/ტ და 8,5 ტ/სთ-ით იზრდება წარმადობა. იმისათვის, რომ დნობის ტექნოლოგიური მიზანი არ დაირღვეს და წარიმართოს სასურველი მიმართულებითა და სისწრაფით, დიდი მნიშვნელობა ენიჭება საწიდე მასალების მიწოდების ხერხებს (რა დროს უნდა მიეწოდოს ესა თუ ის მასალა, მასალების მიწოდების ადგილს ღუმელში, მასალის დანატროვნებას, მასალის მიწოდების რიგს და ა.შ.). გამოდნობის, კლასიკური მეთოდისაგან განსხვავებით ზემძლავრ ღუმელებში გაუნახშირბადოება, დეფოსფორაცია და ლითონის გახურება თითქმის ერთდროულად მიმდინარეობს. თანამედროვე

ზემძლავრ ღუმელებში სასურველი ტექნოლოგიური პროცესების წარმართვისათვის აუცილებელია მართვის ავტომატიზებული სისტემა განვითარებული უკუკავშირებით, რაც საშუალებას იძლევა გათვალისწინებული და წონასწორობაში მოყვანილი იქნეს ღუმელის კონსტრუქციების თბური მდგომარეობა. ამასთან, იგი იმგვარად უნდა აწესრიგებდეს ენერგეტიკულ რეჟიმს, რომ უკიდურესად შეამციროს დრო ღუმელიდან თხევადი ლითონის ერთი გამოშვებიდან მეორემდე. განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა აგრეთვე ღუმელის წილის ციცხეში მოხვედრის თავიდან აცილებას. ამას დიდი მნიშვნელობა აქვს თხევადი ლითონის ციცხეში დამუშავებისათვის. ციცხეში დამუშავება გულისხმობს თხევადი ლითონის დაყვანას საბოლოო ქიმიურ შედგენილობამდე, რაც მთავარია, ვაკუუმირებას მთლიანად ან პორციებით, აირებით გაქრევას, ლითონში გახსნილი ნახშირბადის მინიმუმამდე დაყვანას. გახურებას, ლითონის გადახურება ხდება. ე.წ. ციცხე-ღუმელში. ასეთი ციცხე-ღუმელი შექმნილია დიდი დნობისათვისაც - 110 ტ. რადგან არსებობს ციცხეში ლითონის გადახურების საშუალება, ამიტომ ღუმელიდან ლითონის გამოშვება შეიძლება მოხდეს 50-70 °C-ით უფრო ნაკლებ ტემპერატურაზე, ვიდრე ეს საერთოდ ხდება. ეს კი ამცირებს დნობის ხანგრძლივობას 85-დან 77 წუთამდე, ელექტროენერჯიის ჯამურ ხარჯს 10-30 კვტ.სთ/ტ-ით; ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯს 10-30 %-ით. ციცხეში ასეთი დამუშავება, ბუნებრივია, მოითხოვს ყველა ამ პროცესის ავტომატიზაციას.

დნობის ხანგრძლივობის და ელექტროენერჯიის ხარჯის შემცირებისათვის თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელები აღჭურვილია აირ-ჟანგბადის სანთურებით. ელექტროფოლადისადნობ საამქროში, რომელიც ეკუთვნის ფირმას „Sudwetfohrn AU“ (გფრ). გამოიკვლიეს ასეთი სანთურების გავლენა დნობის მაჩვენებლებზე 38 და 110 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის [74]. სანთურები შეჰყავდათ ღუმელის ცივ ადგილებში. სანთურები მუშაობდნენ 5-10 წუთის განმავლობაში კაზმის ჩატვირთვის შემდეგ, რის შემდეგაც ავტომატურად გამოქქონდათ ღუმელიდან და ხვრელებს ხურავენ. აირის უდიდესი ხარჯი თითოეულ სანთურაზე შეადგენდა 200 და 300 მ³/სთ და ჟანგბადისა - 400 და 700 მ³/სთ, შესაბამისად. უსანთურებოდ გამოდნობილი იქნა 7 დნობა და 8 - სანთურებით 38 ტ ტევადობის ღუმელზე, ხოლო 20 დნობა უსანთურებოდ და 17 დნობა სანთურებით 110 ტ ტევადობის ღუმელზე. 38 ტ ტევადობის ღუმელზე დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა სანთურების გამოყენებისას 116 წუთიდან 114,9 წუთამდე (1,4 %-ით), ელექტროენერჯიის ხვედრითი ხარჯი - 596-დან 528 კვტ.სთ/ტ-მდე (1,4 %-ით).

ამავე დროს, გაიზარდა საერთო ენერჯის ხვედრითი ხარჯი (მხედველობაში იქნა მიღებულ აირის ენერგოშემცველობა (9 კვტ.სთ/მ³), საშუალოდ 596-დან 634 კვტ.სთ/ტ-მდე (6,4 %-ით). 110 ტ ტევადობის ღუმელზე სანთურების გამოყენებით ენერჯის ხვედრითი ხარჯი შემცირდა 15 კვტ.სთ/ტ-ით ლევირებული ფოლადის გამოდნობისას და 22 კვტ.სთ/ტ-ით – ჩეულებრივი ფოლადის გამოდნობისას. ენერჯის საერთო ხვედრითი ხარჯი გაიზარდა 34 კვტ.სთ/ტ-ით. გადნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 1,7 წუთით ლევირებული და 1,5 წუთით ჩეულებრივი ფოლადისათვის, აირის 3 მ³/ტ-ზე ხარჯისას და 4,3 წუთით აირის 4,5 მ³/ტ-ზე ხარჯისას. ღუმელის წარმადობა ჩეულებრივი ფოლადის გამოდნობისას გაიზარდა 4,8 ტ/სთ-ით (3 მ³/ტ აირის ხარჯისას) და 8,5 ტ/სთ (4,5 მ³/ტ აირის ხარჯისას). სანთურების გამოყენების ეკონომიკურობა იზრდება აირის ხვედრითი ხარჯის გაზრდასთან ერთად. მაგრამ მისი უსაზღვროდ გაზრდა არ შეიძლება, რადგან მატულობს თბური დატვირთვა ღუმელის კედლებზე და ელექტროდებზე. აირ-ჟანგბადის სანთურების გამოყენებამ არ გამოიწვია წიდის დონის შეცვლა და აირების გამოყოფის ზრდა.

აირ-ჟანგბადის სანთურების გამოყენებაზე არსებობს სხვა შეხედულებებიც. გარდა იმისა, რომ მისი გამოყენების ეფექტურობა დამოკიდებულია ღუმელის ტევადობაზე, დიდი გავლენა აქვს აგრეთვე აირისა და ჟანგბადის ღუმელში შეყვანის ხერხებსა და კაზმის შემადგენელი ნაწილების ნაჭროვნებას.

ზემძლავრი ღუმელების შექმნამ დასუა მათი ცეცხლგამძლე ამონაგის მედეგობის გაზრდის საკითხი. თუ „კლასიკური“ ტექნოლოგიით მომუშავე ღუმელებისათვის კედლებისა და კამარის ცეცხლგამძლე ამონაგი ასე თუ ისე აკმაყოფილებდა წარმოებას, მძლავრი ელექტრული რკალის გამოყენებისას ცეცხლგამძლე ამონაგის ხარჯი ძალიან გაიზარდა, რამაც უარყოფითად იმოქმედა ღუმელის წარმადობასა და ფოლადის თვითღირებულებაზე. ზემძლავრ ღუმელებში წყლით საცივებელი კედლებისა და კამარის გამოყენებამ შეამცირა ცეცხლგამძლე მასალის გავლენა ღუმელის წარმადობასა და ეკონომიკურობაზე, მიუხედავად იმისა, რომ ცეცხლგამძლე მასალის სწორ შერჩევაზე ბევრად არის დამოკიდებული ღუმელის წარმადობის გაზრდა. ამ შემთხვევაში იმ ცეცხლგამძლე მასალის ცვეთას, რომელიც წყლით საცივებელი ელემენტების ქვევით მდებარეობს, გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება.

ფირმა „ჰამბურგერის“ ქარხანაში ჩატარებული გამოკვლევები [75] ეხებოდა ტექნოლოგიური ღონისძიებების შემუშავებას ცეცხლგამძლე ამონაგის ცვეთის შესამცირებლად. მართალია, საკაზმე

მასალაში ღრუბლოვანი რკინის საკმაოდ დიდი რაოდენობა იყო (49,1 %), რაც ამონაგის ცვეთაზე გარკვეულ გაელენას ახდენდა, მაინც შეიქმნა ზოგადი წარმოდგენა ზემოქალიური ღუმელების ამონაგის შესახებ. 100 ტ ტეჟადობის ღუმელი მუშაობდა შემდეგი მონაცემებით: ტრანსფორმატორის სიმძლავრე 75 მკვ.ა; დღეღამური წარმადობა 20–21 დნობა ანუ დნობის საშუალო ხანგრძლივობაა 74 წუთი, რაც შეადგენს 83,8 ტ/სთ. ამასთან დნობის გამომშვებას, ღუმელის შეკეთებას, კაზმის ჩატვირთვასა და ელექტროდების მომსახურებას დასჭირდა 15,3 წუთი; ძაბვის ქვეშ ღუმელის ყოფნას (გადნობა, რაფინირება, გადახურება) – 57,8 წუთი; მოცდენებს – 0,4 წუთი. მთელი დნობის ხანგრძლივობის 85 %-ს ღუმელი მუშაობდა სიმძლავრის კოეფიციენტის $\cos\alpha=0,82$ მნიშვნელობით. ასეთი ელექტრული რეჟიმისას და მეორადი ძაბვის 720–750 ვ მნიშვნელობისას რკალის სიგრძე აღწევდა 300 მმ-ს. რკალის ასეთი სიგრძისას თბოგამოსხივება იმდენად დიდია, რომ ვერ გაუძლებდა წყლით საცივებელი ელემენტების ქვეშ არსებული მაღალხარისხოვანი მაგნეზიტის ამონაგიც კი, რომელსაც უნდა გაეძლო მაღალი თბური დატვირთვისათვის. ამის გამო დამატებით შექმნეს დნობის ისეთი რეჟიმი, განსაკუთრებით რაფინირებისა და ლითონის გადახურებისას, როცა კედლის აღნიშნული ადგილი რკალის მოქმედებისგან დაცული იყო წილის მაღალი ფენით.

რკალურ ღუმელში ამონაგის ცვეთა დამოკიდებულია ძირითადად ორ მიზეზზე: 1. ამონაგის ამოჭმაზე ქიმიური რეაქციების შედეგად მასზე მოხვედრილი ლითონისა და წილის მხეყების გამო; 2. რკალების თბოგამოსხივების მიერ მოსულ თბურ დატვირთვებზე. ღუმელის კედლებზე მოსულ თბურ დატვირთვებს განსაზღვრავენ გამოსხივების კოეფიციენტი. ეს კოეფიციენტი დამოკიდებულია არა მარტო მეორად ძაბვაზე, არამედ ელექტროდსა და ღუმელის კედელს შორის მანძილზე. გამოსხივების კოეფიციენტი მცირდება ამ მანძილის კვადრატის პროპორციულად. ამ მანძილის გაზრდით მცირდება აგრეთვე წილისა და თხევადი ლითონის მხეყებით გამოწვეული კედლების ამონაგის ეროზია.

ამრიგად, მძლავრ რკალურ ღუმელებში, წყლით საცივებელი კედლების მიუხედავად, კედლების ამონაგის ცვეთა შეიძლება შემცირდეს შესაფერისი ცეცხლგამძლე მასალისა და დნობის რეჟიმის რაციონალური ტექნოლოგიის შერჩევით. ეს კი საშუალებას იძლევა შემცირდეს ხარჯები ცეცხლგამძლე მასალებზე.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, წყლით საცივებელი ელემენტების გამოყენებისას იზრდება 1 ტ გამოდნობილ ლითონზე დახარჯული სითბო (თბური დანაკარგები). თბური დანაკარგებით

კამოწვეული ხარჯების შემცირება ან დაფარვა შეიძლება მოხდეს იმ სითბოს გამოყენებით, რომელიც გამაცივებელ წყალს გამოაქვს ღუმელიდან. ამ მიზეზებითა და აგრეთვე გამაცივებელი სისტემის მუშაობის გაუმჯობესების მიზნით, შემუშავებულია ღუმელის ელემენტების გაცივების რამდენიმე ხერხი. სემპლარეი ღუმელების ექსპლუატაციის პირობები მოითხოვენ საკმაოდ დიდ ხარჯებს ღუმელის კედლებისა და თაღის გამაცივებელი სისტემების შექმნასა და ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯის შემცირებაზე. ნებისმიერი პროცესისას, რომელიც დაკავშირებულია ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობის შეცვლასთან, ადგილი აქვს დანაკარგებს, რომლებიც განსაზღვრავენ პროცესის მ.კ.კ.-ს. ფოლადის გამოდნობისას ზუსტად ასეთი სურათია. თუ რკალური ღუმელის ელექტროენერგიის ხარჯს მის წარმადობას შეუფარდებთ, მაშინ ელექტროენერგიის ხვედრითი ხარჯი მით უფრო მცირე იქნება, რაც მეტია რკალური ღუმელის წარმადობა. ელექტროფოლადსადნობ წარმოებაში ასეთ მდგომარეობას მიუყვართ დიდი სიმძლავრეების გამოყენებისკენ გადნობის პერიოდში, რაც თავის მხრივ იწვევს ღუმელის კედლებსა და თაღზე თბური დატვირთვისა და შესაბამისად, ცეცხლგამძლე მასალებზე ხარჯების ზრდას. ამიტომ კედლებიცა და თაღიც წყლით უნდა ცივდებოდეს.

ამჟამად წარმოებაში გამოიყენება [76] სამი სახის გაცივება: 1. დენის მიმყვანთა, საკვამლე მილის, ელექტროდების დამჭერების, სამუშაო ფანჯრისა და ა.შ. წყლით გამაცივებელი სისტემა, სადაც წყალი ხურდება 50 °C-მდე. 2. თაღის დასაბჯენი რგოლის, სამუშაო ფანჯრის ჩარჩოს, აირების გამოსაყვანი მილის თაღზე საბრჯენის, წყლით გამაცივებელი სისტემა, სადაც წყალი ხურდება 90—135 °C-მდე. 3. აორთქლებითი გაცივების სისტემა კედლებისა და თაღის გაცივებისათვის. გამაცივებელი სისტემის ასეთი დაყოფისას უფრო მოსახერხებელი ხდება გახურებული წყლის ან ორთქლის გამოყენება სხვადასხვა მიზნებისათვის, რაც ზრდის ღუმელიდან გამოყვანილი სითბოს გამოყენების კოეფიციენტს და ამით მცირდება ფოლადის თვითღირებულება. მართალია, აორთქლებითი გაცივების სისტემა ზრდის ხარჯებს წყლით გამაცივებელ სისტემასთან შედარებით, მაგრამ ეს ხარჯები სწრაფად ამოიგება. აორთქლებითი გაცივების სისტემა ეკონომიკურადაც იმიტომ არის ეფექტური, რომ მარტო მისი საშუალებით ხდება გამოტანილი სითბოს მთლიანი გამოყენება. აორთქლებითი გაცივების სისტემის გამოყენება მოითხოვს მრავალი წამოჭრილი რთული საკითხის გადაწყვეტას და, რასაკვირველია, თეორიულ გამოთვლებსაც. მართალია სიძნელებები იქმნება, მაგრამ აორთქლების

გამოყენებას გაცივებისათვის იმდენად დიდი ეფექტი მოხდევს თან, რომ მისი უგულვებელყოფა სირთულეების გამო არ შეიძლება. თეორიული გამოთვლების შედეგად [77] შესაძლებელი ხდება დადგინდეს წყლის ტემპერატურისა და წნევის ოპტიმალური ზღვრები, რომლის დროსაც მიიღწევა ყველაზე კარგი შედეგები.

რკალური ღუმელის ზედა ნაწილში ამონაგის მაგივრად გამოიყენება ელემენტები, რომლებიც გამდინარე წყლით ცივდებიან. წყლით საცივებელი ეს ელემენტები განიცდიან მაღალ თერმულ დატვირთვებს, ამიტომ შესაძლებელია დაიწყოს გამაცივებელი წყლის აორთქლება. ამასთან დაკავშირებული ბუშტებიანი დუღილი ხელს უწყობს გაცივების ინტენსივობის მნიშვნელოვან ზრდას. მაგრამ თბური ნაკადის სულ მცირე გაზრდასაც კი შესაძლებელია მოჰყვეს გასაცივებელი ზედაპირის გადახურება კრიტიკული ტემპერატურის ზევით, რაც გამოიწვევს მის დაზიანებას. ამიტომ წყლითა და ორთქლით გასაცივებელი ელემენტების დაპროექტებისას უნდა იყოს გათვალისწინებული აორთქლების პროცესი.

ეკონომიკური თვალსაზრისით, რკალური ღუმელების ზედა ნაწილი, წილის დონის ზევით, ამოიგება არა ცეცხლგამძლე მასალით, არამედ კეთდება წყლით საცივებელი ელემენტებისაგან. ამასთან, იმ ელემენტების გაცივება, რომლებიც იკავენს ღუმელის კედლების 75 %-ს წილის დონის ზევით, ხდება გამდინარე წყლით. გაცივების ასეთი ხერხისას წყლით საცივებელი ელემენტებზე, რომლებიც შეიძლება დამზადდეს ფოლადის ან სპილენძისაგან, მოქმედებს სითბო, რომელიც გამოიყოფა გამოსხივებით როგორც გახურებული ლითონისა და წილის ზედაპირიდან, ისე რკალებიდან. სითბო თბოგადაცემით გადის ღუმელის კედელზე მიშხეფებული წილის ფენაში, წყლით საცივებელი ელემენტის კედელში და შემდეგ კონვექციით გადაეცემა გამაცივებელ წყალს. გამაცივებელი წყალი ხურდება წყლით საცივებელი ელემენტში გადინების მთელ მანძილზე. ამიტომ წყლის გადინების სიჩქარე უნდა შეირჩეს ისე, რომ წყლის ფაქტობრივსა და დუღილის ტემპერატურებს შორის სხვაობა, გაცივების ხერხისაგან დამოკიდებულებით, შეადგენდეს: ცივი წყლით გაცივებისას – 100°C -ს, თბილი წყლით გაცივებისას – 50°C -ს და ცხელი წყლით გაცივებისას სულ რამდენიმე გრადუსს. თბილი და ცხელი წყლით გაცივებას მიმართავენ მაშინ, როცა არსებობს გამაცივებელი წყლის სითბოს გამოყენების შესაძლებლობა. ცხელი წყლით გაცივება მაშინაც შეიძლება გამოვიყენოთ, როცა სასურველია წყლის წარმოქმნილი ორთქლის შემდგომი გამოყენება. ცხელი წყლით გაცივებისას,

გარდა იმისა, რომ გამოიყენება მისი ენერჯია, კარგია იმითაც, რომ ბუშტებიანი დუღილის გამო იზრდება გაცივების ეფექტურობა.

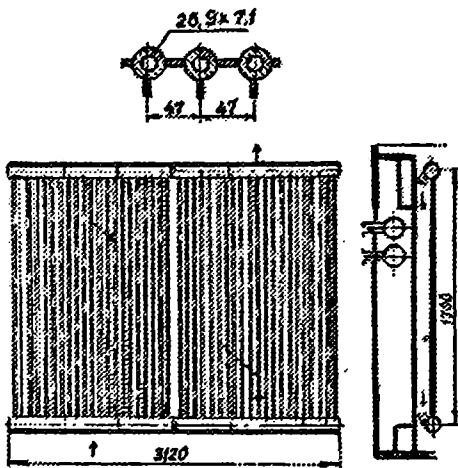
გაცივების სამივე ხერხისას ყურადღება უნდა მიექცეს იმ გარემოებას, რომ გამაცივებელ წყალზე გადაცემული თბური ნაკადის მაღალი სიმკერეივის გამო, მიღების კედლებზე შეიძლება წარმოიქმნას ორთქლის უწყვეტი მთლიანი ფენა. მიუხედავად იმისა, რომ მილის შუა ნაწილში წყალი აორთქლებული არ იქნება, ასეთი მთლიანი ფენა მილის შიდა ზედაპირზე ხელს უშლის სითბოს გადაცემას გამაცივებელ წყალზე, რის გამოც მილის კედლის ტემპერატურა სწრაფად იზრდება და შეიძლება მიაღწიოს ისეთ სიდიდეს, რომ მილები დაზიანდეს და წყალი ღუმელში მოხვდეს.

ერთ-ერთი პირველი ზემძლავრი რკალური ღუმელი (გარსაცმის დიამეტრი 6,7 მ; გამოდნობილი ლითონის მასა 125 ტ; ტრანსფორმატორის სიმძლავრე 100 მგვ.ა) ორთქლის გამაცივებლებით, ამუშავდა 1981 წელს ფირმა "Tisen niderinis"-ის ქარხანაში (ქ. ობენა-აუზერი) [78]. გამაცივებელი წყალის წნევა მერყეობდა 13–23 ბარის* დონეზე, რასაც შეესაბამებოდა დუღილის ტემპერატურას 179–218 °C. ორთქლი 13 ბარის წნევით გადაეცემოდა მომხმარებელს, თუ არ იყო ორთქლის მომხმარებელი, ან სხვა მიზეზის გამო, შესაძლებელი იყო ორთქლის წნევის გაზრდა 23 ბარამდე, ხოლო 23,5 ბარის წნევისას ჩაირთვებოდა დამცველი და ორთქლი ატმოსფეროში გავიდოდა. საცივებელი კედლის ზედაპირის ფართობი შეადგენდა 33 მ²-ს. წყლის მიმოქცევის ხარჯი – ~350 ტ/სთ. ეს ხარჯი დამოკიდებულია წნევასა და ტუმბოების მახასიათებლებზე. ორთქლების სისტემაში წნევის ვარდნა არ აღემატებოდა 4 ბარს. ღუმელის ზედა ნაწილში მოთავსებული იყო 6 დაწყვილებული საცივებელი ელემენტი (სურ. 10.12). თითოეული ელემენტი შედგება ზედა და ქვედა შემკრებისაგან (კოლექტორისაგან). სითბოს კარგი განაწილების მიზნით შემკრებები გაყოფილი იყო ტიხრებით სამ ნაწილად; წყალი მიეწოდებოდა ქვედა შემკრებს. გაცივების უბნის ორიმესამედი (ქვედა შემკრებიდან დაწყებული) აღჭურვილი იყო მილებით ორთქლის წნევის გაწონასწორებისათვის და ამით ცალკეულ მილში მისი ხარჯის გათანაბრებისათვის. წყლის მილების მანჭვალეებზე გადებული თამასების

* 1 ბარი = $10^5 \text{ პა} = 10^5 \frac{\text{ნ}}{\text{მ}^2} = 0,98 \text{ ატმ} = 7,5 \cdot 10^2 \text{ მმ Hg} = 1 \text{ ატ.}$

1 ატმ = 1,01325 · 10⁵ პა; ატმ – ფიზიკური (ნორმალური) ატმოსფერო;

1 ატ = 1 კგ/სმ² ≈ 9,81 · 10⁴ პა; ატ – ტექნიკური ატმოსფერო.



სურ. 10.12. ორთქლით გამაცივებელი სისტემის დაწვეილებული გამაცივებელი ელემენტი.

წყალობით ხდებოდა მიშხეფებული წიდის დაკაება. ამას გარდა, თამასები ელექტრული განმუხტვის საშუალებაც იყო. საცივებელ მილებზე, ცხელი წერტილების ადგილზე (ელექტროდების პირდაპირ), დამაგრებული ჰქონდათ ტემპერატურული გადამწოდები, რაც წყლის ტემპერატურის შემოწმების საშუალებას იძლეოდა. თუ ტემპერატურა 250°C -ს გადააჭარბებდა, ელექტროდები ზემოთ აიწეოდა. საცივებელი ელემენტების უდიდესი ნაწილი უძლებდა 4000 დნობას, თანაც, შემოწმების და შეკეთების შემდეგ ელემენტები ხელმეორედ გამოიყენებოდა. იმ შემთხვევაში, როცა აორთქლებით გამაცივებელ სისტემაში თბური ნაკადის სიმკვრივე აღემატებოდა 1000 კვტ/მ²-ზე, აღებული წნევის და 3,0 მ/წმ წყლის ხარჯის პირობებში, მაშინ ცხელ წერტილებში აყენებენ სპილენძის წყლით საცივებელ მილებს, რომელთა თეორიული თბური ნაკადის სიმკვრივეა 6000 კვტ/მ². სპილენძის წყლით საცივებელი მილები გაცილებით უფრო დიდხანს მუშობენ. ამჟამად მიღწეული წარმადობის პირობებში (70 ტ/ს), გამოტანილი სითბოს გამოყენებით მიღებული ენერჯის რაოდენობა შეადგენს 39 კვტ.სთ/ტ-ზე. ეს სიდიდე მუდმივი არ არის, დამოკიდებულია კაზმში მოხვედრილი საწვავი მასალების (ზეთი, ფისი და სხვა) რაოდენობაზე და აგრეთვე, თვითონ გამაცივებელი სისტემის კონსტრუქციაზე. მიუხედავად იმისა, რომ გაცივების ხერხები ჯერ კიდევ არასრულყოფილია, მათი გამოყენება უკვე მეტად ეფექტურია და ზემდგავრი

ღუმელების დაპროექტება წყლით საცივებელი ელემენტების მიერ გამოტანილი თბური ენერჯიის გამოყენების გარეშე არ ხდება.

საცივებელი პანელების გაფუჭების შემთხვევაში საჭიროა მათი გამოცვლა, რაც საკმაოდ რთულია. ღუმელის კედლების საცივებელი პანელებისაგან ამჟამად შექმნილია ისეთი კონსტრუქცია, რომ მათი გამოცვლა ღუმელის გარედანაცაა შესაძლებელი. [79]. პანელების გამოცვლისას გამოსწვევენ ორ მილს, რომლებშიც გადის გამაცივებელი წყალი, პანელს ასწვევენ ამწით, ჩასვამენ ახალს, ისევ მისწვევენ წყლის მილებს, შეუერთებენ პანელს და ჩართავენ ღუმელს. პანელების გამოცვლის ასეთი ხერხი მეტად აადვილებს შეცვლის პროცესს და ამცირებს მასზე დახარჯულ დროს. გამაცივებელი წყლის სითბოს გამოყენების მიზნით შექმნილია ჩაკეტილი წრე 20 მ³ წყლის მოცულობით. წნევა 10 ბარი, წყლის ტემპერატურა 110 °C. 0,2 ბარით წნევის დაეარდნის შემთხვევაში ჩაირთვება წყლის მიწოდების ავტომატური ჩამრთველი. თუ წნევა 5 წმ-ის განმავლობაში არ ავიდა თავის პირვანდელ მნიშვნელობამდე, ეს იმის ნიშანია, რომ პანელიდან წყალი გამოდის და ჩაირთვება სიგნალიზაცია.

დასაელეთ ვეროპაში გამაცივებელი წყლის ენერჯიას ფართოდ იყენებენ საყოფაცხოვრებო დანიშნულებისათვის. ერთი ღუმელიდან გამომავალი გამაცივებელი წყლის ენერჯიის გამოყენება მთელი წლის განმავლობაში ზოგავს 3000 ტ თხევად საწვავს.

როგორც გეიჟენებს განვითარებული კაპიტალისტური ქვეყნების გამოცდილება ფოლადის წარმოების დარგში, წყლით საცივებელი პანელების გამოყენებამ ხელი შეუწყო ღუმელის კედლებისა და თადის ამოშენებაზე საჭირო ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯის შემცირებას, რამაც უზრუნველყო ეკონომია 1,6–2,1 დოლ/ტ-ზე.

წყლის, როგორც გამაცივებელი საშუალების გამოყენება, გამოცდილია ელექტროდებზეც. ელექტროდები საკმაოდ ძვირადღირებულ მასალას წარმოადგენს და ამიტომ მათი ხვედრითი ხარჯის შემცირებას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება. ელექტროდის ხარჯი შედგება ორი ნაწილისაგან: დანაკარგები რკალის მხრიდან და დანაკარგები ელექტროდის გვერდითი ზედაპირიდან. დანაკარგი გვერდითი ზედაპირებიდან [80] შეიძლება შემცირდეს ღუმელის მჭიდროდ დახურვით (რათა ატმოსფეროს ჟანგბადი ნაკლებად მოხედეს ღუმელში), კაზმის გახურებით, გაცივების ხანგრძლივობის შემცირებით და ა.შ.. გარდა ამისა, ელექტროდის გაცივებით. პირველი ასეთი ცდები ჯერ კიდევ 70-იან წლებში ჩატარდა. ელექტროდის გაცივების ყველაზე მარტივი და საიმედო ხერხია ლითონისაგან დამზადებული წყლით საცივებელი ელექტროდის

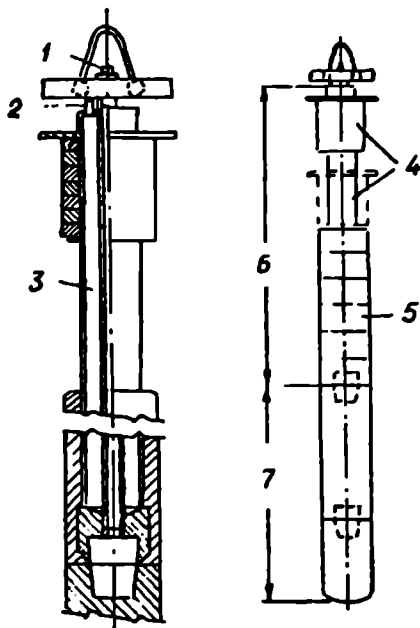
გამოყენება, რომელსაც ბოლოებზე შეერთება გრაფიტის ელექტროდი. გრაფიტული ნაწილის სიგრძე დამოკიდებულია უამრავ მიზეზზე: გრაფიტის თბოგამტარობასა და ფორიანობაზე; ელექტროდში ტემპერატურის გაერცვლებაზე; გრაფიტის გადახურების ხარისხზე და სხვ. რკალის მიდამოებში ელექტროდი ხურდება 4000 °C-ზე, კამარის მიმართულებით ელექტროდის ტემპერატურა კლებულობს და ელექტროდის დამტკერის მახლობლად აღწევს 500 °C-ს. 100 ტ ტევადობის რკალური ღუმელისათვის ელექტროდის იმ ნაწილის სიგრძე, რომელიც იქანგება, შეადგენს ~ 6 მ-ს. აქედან 4-დან 5 მეტრამდე წარმოადგენს წყლით საცივებელ ნაწილს, ხოლო დანარჩენი – გრაფიტის ელექტროდი. ელექტროდის საცივებელი და გრაფიტული ნაწილების გადაბმის ადგილის ტემპერატურა არ არის დამოკიდებული გრაფიტული ნაწილის სიგრძეზე. გრაფიტის ელექტროდის ღერძული ნაწილი უფრო მეტად ცივდება, ვიდრე მისი გვერდითი ზედაპირი. გრაფიტის ელექტროდის 2,4 მ-ის სიგრძისას გაცივების გაელენა შეიძინევა გაცივების ადგილიდან 0,8 მ-ის მანძილზე, ხოლო 1,2 მ-ის შემთხვევაში კი – მთელ სიგრძეზე. ცდებით დადგინდა, რომ ელექტროდის გრაფიტული ნაწილი 1 მ-ს არ უნდა აღემატებოდეს, მაგრამ ამ შემთხვევაში საჭიროა მისი ხშირად გამოცვლა, რის გამოც ოპტიმალური სიგრძეა 1,8–2,0 მ-ით. ელექტროდის გრაფიტული ნაწილის გამოსაცვლელად ელექტროდს ამოიღებენ ღუმელიდან, დებენ სპეციალურ სტენდზე, ცვლიან მას და ამავე დროს ამოწმებენ ელექტროდის ლითონური ნაწილის პერმეტულობას. გამაცივებელი სისტემიდან წყლის მიერ გატანილი ენერჯიაა 186 კვტ (70 ტ ტევადობის ღუმელისათვის) და 260 კვტ (110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის). წყლით საცივებელი ელექტროდების გამოყენებისას ელექტროდების ხარჯი შემცირდა და გახდა 2–3,5 კვ/ტ ფოლადზე. ხარჯის ეს დონე დღეისათვის წარმოადგენს ზღვარს ცვლადი დენის რკალური ღუმელისათვის, ხოლო მუდმივი დენის რკალური ღუმელებისათვის კი ეს მაჩვენებელი შეიძლება უფრო შემცირდეს და გახდეს 1 კვ/ტ ფოლადზე. ასეთი ელექტროდები მზადდება გერმანიაში. სპეციალური კვანძებით და მექანიზმებით, კონტროლისა და მართვის კომპიუტერული სისტემით აღჭურვილი მათი კომპლექტის ღირებულება ჯერჯერობით ძვირია. ელექტროდების დამამზადებელი ქარხნის მონაცემით გარანტირებულია ელექტროდების ხარჯის 15–20 %-ით შემცირება. საერთო ეკონომიკური შედეგები დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ გადაფარავს ელექტროდების ხარჯის შემცირება იმ დანაკარგებს, რომლებსაც გამოიწვევს ელექტროდების შეცვლის გახანგრძლი-

ვება. წყლის საცივებელი კომბინირებული ელექტროდების რკალურ ღუმელში გამოყენების საწარმოო ცდების შედეგები გამოქვეყნებულია ნაშრომში [83]. ეს ელექტროდები შედგება ლითონური წყლით საცივებელი და გრაფიტული ნაწილებისაგან. ამასთან, გამოცდილია რამდენიმე სახესხვაობა: 1. მცირე ან საშუალო სიგრძის ლითონური ნაწილი ზედაპირული დაფარვის გარეშე; 2. საშუალო სიგრძის ლითონური ნაწილი კერამიკული დაფარვით; 3. მცირე სიგრძის ლითონური ნაწილი ზედაპირის დაუფარავად და ელექტროდის შუა ნაწილი წყლით საცივებელი გრაფიტით; 4. გრძელი შუა ნაწილი მასზე მიმაგრებული კერამიკული დაფარვით. ტრადიციული გრაფიტის ელექტროდებთან შედარებით, წყლით საცივებელი კომბინირებული ელექტროდების ხარჯი მცირდება: ელექტროდების გვერდების ზედაპირის დაუანგვით გამოწვეული დანაკარგები – 40 %-ით, ელექტროდების გადაბმის ადგილის დაუანგვით გამოწვეული თერმულ-მექანიკური ცვეთა და მექანიკური დაძაბულობა – 35 %-ით; მექანიკური დაძაბულობით (ღუნვით) გამოწვეული დანაკარგები – 3–4 %-ით.

ასეთი კომბინირებული ელექტროდის ზედა ლითონური ნაწილი (სურ. 10.13) წარმოადგენს სპილენძის მსხვილ მილს, რომელიც ბოლოვდება სპილენძისავე ბლოკით. მასში ამოჭრილია ხრახნი გრაფიტის ნიპელისათვის და ასევე ცივდება წყლით. რადგან ელექტროდები ღრმად ჩადიან ღუმელში, ამიტომ მათი ლითონური ნაწილი დაფარული უნდა იყოს თხევადი წილისა და ლითონის შხეფებისაგან. ამისათვის მას უსვამენ კერამიკა-გრაფიტის ნარეუს.

კომბინირებული ელექტროდების გამოყენებისას განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა ღუმელის უსაფრთხო მუშაობას. თუ დარღვეულია წყლის მიწოდების რეჟიმი, ღუმელი ავტომატურად გამოირთვება და ელექტროდები ზევით აიწვია. ღუმელი გამოირთვება იმ შემთხვევაშიც, თუ ტემპერატურამ ზღვრულს გადააჭარბა ყოველ ფაზას განცალკევებულად აკონტროლებს ავტომატიკა. ერთი ელექტროდის გასაცივებლად საჭირო წყლის ხარჯია 10–25 მ³/სთ. იგი დამოკიდებულია ელექტროდის დიამეტრსა და წყლის ტემპერატურაზე. მაგალითად, თუ ელექტროდის დიამეტრსა 550–600 მმ, წყლის ხარჯია 20 მ³/სთ, 450–500 მმ – 15 მ³/სთ, ხოლო როცაა 400–450 მმ – 12 მ³/სთ.

ამრიგად, ავტორების დასკვნით, წყლით საცივებელი ელექტროდების გამოყენებით შეიძლება მივალწიოთ გრაფიტის ეკონომიას 22–37 %-ით. 80 ტ ტევადობის ღუმელზე ჩატარებული ხანგრძლივი ცდების შემდგომ გრაფიტის ეკონომია, საშუალოდ 29,5 % ღუმელის



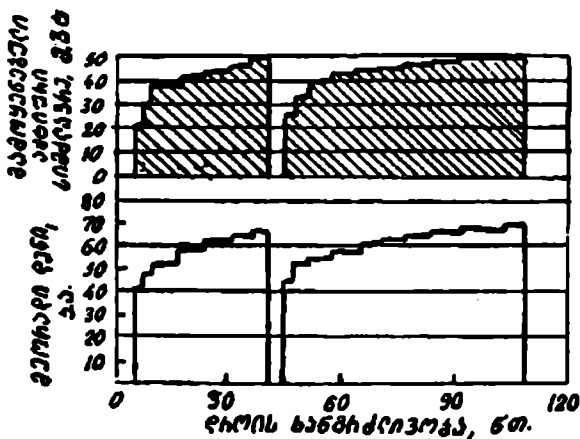
სურ. 10.13. წყლით საცივებელი კომბინირებული ელექტროდები: 1. წყლის შესასვლელი; 2. წყლის გამოსასვლელი; 3. წყლით შევსებული მოცულობა; 4. ელექტროდის დამკერი; 5. დამკვედი რგოლი; 6. ელექტროდის არამომუშავე ნაწილი; 7. ელექტროდის მუშა (გრაფიტული) ნაწილი.

სახეობის და მისი მუშაობის რეჟიმისაგან დამოკიდებულებით წმინდა ეკონომიკური მოგება შეადგინა 7–14 % (გათვალისწინებულია ხარჯები სპილენძსა და გამააცივებელ წყალზე).

ელექტროდების ზედაპირის დაჟანგვის თავიდან აცილების სხვა საშუალებებიც არსებობს. მაგალითად, ბულგარეთში შექმნილია სპეციალური ფხენილების ნარევეები, რომლებსაც უსვამენ ელექტროდებს. ასეთი ნარევეები იკავებენ ელექტროდებს დაჟანგვისაგან და ამცირებენ მათ ხარჯს 20 %-ით. ეს ხერხიც ფრიად გაერცვლებულია მეტალურგიულ წარმოებაში.

ელექტრორკალური ღუმელის მუშაობის გაუმჯობესებისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ოპტიმალური ელექტრული რეჟიმის სერჩევას ეს საკითხი ნაწილობრივ უკვე განხილული იყო წინა თავებში. ღუმელის კედლებისა და კამარის წყლით საცივებელი ელემენტებით აღჭურვისას შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს ისეთი ელექტრული რეჟიმი, რომლის დროსაც ღუმელმა ძაბვის ქვეშ ყოფნის მთელი დროის 80 % იმუშაოს მიყვანილი უმაღლესი

სიმძლავრით და გრძელი რკალებით. ელექტროდების ხარჯი ამ დროს მეკეთრად მცირდება 3,8 კვ/ტ-მდე ძირითადად მეორადი დენის შემცირებისა და ღუმელის წარმადობის გაზრდის გამო. რადგან ასეთი კარგი შედეგები მოჰყვება, მეორადი დენის შემცირებას, სასურველი იქნებოდა მისი კიდევ უფრო დადაბლება. ასეთ მოქმედებას რომ არ გამოეწვია ამონაგზე და თაღზე მოსული თბური ნაკადების გაზრდა (რკალის სიგრძის გაზრდის გამო), გამოყენებულია ე.წ. ქაფისებრი წიდა. ამგეარ წიდაში ელექტრული რკალი იმალება და ნაკლებად ზიანდება ღუმელის კედლებსა და თაღს. სურათზე 10.14 მოყვანილია ახალი ელექტრული რეჟიმის გრაფიკი. მთელი დნობის მანძილზე მეორადი დენის ძალა საშუალოდ 60-63 კა იყო. ხოლო სინამდვილეში გამოყენებული სიმძლავრე კი - 45 მგვტ. გადნობის პერიოდის განმავლობაში ტრანსფორმატორი მუშაობდა უმაღლეს საფეხურზე, მაგრამ არ გადატვირთულ. ამ პერიოდში საშუალო მოჩვენებითი სიმძლავრე იყო 53 მგვტ, თხევადი აბაზანის პერიოდში - 63 მგვტა ღუმელის ორი თვის მუშაობის შემდეგ მიღწეული იყო ასეთი შედეგები: ელექტროდების ხარჯი შემცირდა 3,3 კვ/ტ-მდე (ელექტროდების გატეხვის და ელექტროდების ნამწვების გათვალისწინებით), ხოლო ცეცხლგამძლე მასალების და ელექტროენერჯისა კი დარჩა იმავე დონეზე. ღუმელზე მიწოდებული სიმძლავრის დაკლების გამო გამოწვეული ელექტროენერჯის ხარჯის დანაკარგების ასანაზღაურებლად გაზარდეს ჟანგბადის ხარჯი საშუალოდ 18-დან 25 მ³/ტ-მდე,



სურ. 10.14. ღუმელში სიმძლავრის შეყვანის გრაფიკი დნობის მსვლელობისას

შემდგომში 30 მ³/ტ-მდე, გაზრდის და კაზმში ნახშირბადის იმავდროული დამატების პერსპექტივით.

დნობის ხანგრძლივობის შემცირების მიზნით ხდება არსებული ტრანსფორმატორების შეცვლა უფრო მძლავრით. რაც საშუალებას იძლევა ღუმელმა იმუშაოს უმაღლესი სიმძლავრით შედარებით მაღალი ძაბვის, მცირე დენის ძალისა და უფრო მაღალი სიმძლავრის კოფეციენტის პირობებში (უმაღლესი სიმძლავრეა 96 მგე.ა, აქტიური მიყვანილი სიმძლავრეა 80 მგე.ა ძაბვისა 650 ვ და დენის ძალა 71 კა. უმაღლესი მეორადი ძაბვაა 800 ვ). რასაკვირველია ასეთი მაჩვენებლებით რკალური ღუმელის მუშაობა შესაძლებელია მხოლოდ წყლით საცივებელი ელემენტების გამოყენებით.

არ უნდა ვიფიქროთ, თითქოს წყლით საცივებელი ელემენტების გამოყენებამ მთლიანად გადაჭრა ცეცხლგამძლე მასალების საკითხი. 100 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის, (გარსაცმის დიამეტრით 6,1 მ და ტრანსფორმატორების სიმძლავრით 45/54 მგე.ა.) ფირმა „ელაიდ სტილ ენდ უაირის“ (დიდი ბრიტანეთი) მიერ ცეცხლგამძლე მასალების ხარისხის გაუმჯობესებისა და მათი მუშაობის გახანგრძლივების მიზნით ჩატარებულმა სამუშაოებმა მკვლევარები მიიყვანა იმ დასკვნამდე, რომ ღუმელის ფერდობის ამოჭმის ძირითადი მიზეზია წიდაში რკინის ჟანგეულების დიდი რაოდენობა დაბალნახშირბადიანი ფოლადების გამოდნობისას. 1982 წლიდან ფერდობის ამოგებას შეუდგნენ გრაფიტის შემკერელებით დამზადებული მაგნეზიტის აგურით. გრაფიტის შემცველობა ასეთ აგურებში მერყეობდა 5-დან 20 %-მდე. ცეცხლგამძლე მასალების რკალისგან დაცვის მიზნით დნობის ადრეულ პერიოდშივე ქმნიდნენ მაღალფუძიან, წიდას, რომელსაც შემდგომში აქაფებდნენ ჟანგბადის შებერვით გრაფიტთან ერთად. მაგრამ გვერდითი კედლების მდგრადობის საგრძნობ გაუმჯობესებას მიღწეის მხოლოდ მაშინ, როცა გამოიყენეს დოლომიტიზირებული კირი და მაგნეზიტის მასით ტოოკრეტირება (მექანიკური შეფრქვევა) 1,5 კგ/ტ-ზე რაოდენობით.

ფირმა „აისკორის“ (სარ) ქარხნებში ღუმელის კედლების ამოგებისათვის იყენებდნენ ორი სახის აგურს. წიდის დონემდე ამონაგს აგებენ ფისებით გაუღნითილი პერიკლაზის აგურისაგან, ხოლო წიდის დონის ზემოთ წყლით საცივებელ პანელებამდე – მაღალნახშირბადიანი აგურით. 250 დნობის შემდეგ ცხელ წერტილებს უტარებდნენ (წიდისა და ლითონის გამოსაშვებ ხვრელებთან) შუალედურ შეკეთებას, ხოლო ამონაგს ცვლიდნენ 700 დნობის შემდეგ. წყლით საცივებელ ელემენტებზე (პანელებზე) არსებულ

გარნისაუს აღადგენდნენ ცივი შეკეთებისას, ხოლო დნობების პროცესში — კაშში დოლომიტის დამატებით, რათა მისი შემცველობა წიდაში გაზრდილიყო 8–10 %-მდე. ცეცხლგამძლე მასალების საერთო ხარჯი შეადგენდა 4,0 კგ/ტ ფოლადზე. კამარის ამოგება ხდებოდა მაღალთიხოვანი აგურებით და დასატკეპნი მასალებით. კამარის ამონაგის საშუალო მედეგობამ შეადგინა 100 დნობა.

თანამედროვე ზემოქალაქური რკალური ღუმელების მანქანების გაუმჯობესების ერთ-ერთ ძირითად გზად ითვლება ღუმელის კონსტრუქციისა და ტექნოლოგიური პროცესების სრულყოფა. პირველი ფოლადსადნობი რკალური ღუმელის შექმნიდან დაიწყო ტექნოლოგიური პროცესების სრულყოფა და განვითარება. ამჟამად, ზემოქალაქური ღუმელების შექმნასთან დაკავშირებით, მუშავდება ახალი და იხვეწება ძველი ტექნოლოგიური პროცესები. ყოველი მათგანის ჩამოთვლა და, მით უმეტეს, აღწერა, მათი სიმრავლის გამო შეუძლებელია. ამიტომ გავეცნოთ ზოგიერთ მათგანს.

იტალიაში [82] 140 ტ ტვეადობის ღუმელში ტოიკებენ წინა დნობის მცირე რაოდენობის თხევად ლითონს, რის გამოც რკალი იმდენად ევლარ მოქმედებს ქვედზე და იგი დაცული რჩება მისი ზემოქმედებისგან. გარდა ამისა, უფრო სრულყოფილად გამოიყენება სიმძლავრე, რკალის ნაადრევი სტაბილიზაციის გამო. ქაყისებრი წილების შექმნა, რომელთაც ღებულობენ ამწიდველების უწყვეტი ჩართვით ღუმელის კამარის ნახერტიდან, საშუალებას იძლევა დნობა წარმართოს წიდაში ჩაყვინთული ელექტროდებით, რაც ამცირებს ელექტროდებისა და ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯს, გამაცივებელი წყლით გამოწვეულ თბოდანაკარგებთან ერთად. ასეთი ღონისძიებების შედეგად ღუმელის წარმადობა გაიზარდა 38 %-ით, დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 3 სთ და 35 წთ-დან 1 სთ და 59 წთ-მდე, საშუალო მიყვანილი სიმძლავრე გაიზარდა 32-დან 50,8 მგვ.ა-მდე. ტექნოლოგიური ელექტროენერჯის ხარჯი გადნობის პერიოდში გაიზარდა 28 კვტ.სთ/ტ-ზე, რაც გამოიწვია კედლების, კამარისა და აირგამწოვის გამაცივებელი წყლის მიერ სითბოს გატანამ, ლითონის გადახურებამ ფოლადის ღუმელსგარე (ციცხეში) დამუშავებისათვის. გაიზარდა ჟანგბადის ხარჯი 8-დან 17 მ³/ტ-მდე სამი სანთურის გამოყენების გამო. ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი შემცირდა 1,4 კგ/ტ-მდე.

ფირმა „ნიკაერელ სტილის“ (აშშ), ერთ-ერთ ქარხანაში დგას ღუმელი გარსაცმის დიამეტრით 6,7 მ. გამოიყენებული სიმძლავრის მაქსიმუმით 67 მგვ.ა, ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 110 მგვ.ა.

ელექტროენერჯის ხვედრითი ხარჯით 440 კვტ/ტ. გადნობის პერიოდში ღუმელში უბერადნენ კირს 35 კგ/ტ-ზე. სანთურები მუშაობდნენ ნახშირბადის ამოწვის დაწყებამდე. სანთურების გამორთვის შემდეგ ღუმელში უბერადნენ წყლიან კოქსს ქაფისებრი წილის წარმოსაქმნელად. ასეთ შემთხვევაში ქაფისებრი წიდა უფრო სწრაფად წარმოიქმნება, ამიტომ რკალიც კარგად სტაბილიზდება და ასევე კარგად ეკრანირდება. გადნობა მიმდინარეობს პრაქტიკულად მუდმივ სიმძლავრეზე 61 მგეტ სიმძლავრის კოეფიციენტით 0,81. დნობის დაყენის პერიოდში სიმძლავრეს ზრდიან 67 მგეტ-მდე, ხოლო სიმძლავრის კოეფიციენტი ვარდება 0,76-მდე. ამის საშუალებას იძლევა ქაფისებრი წილები. დნობისას ღუმელში დაახლოებით 145 ტ ლითონია. გამოშვების შემდეგ ღუმელში ტოვებენ დაახლოებით 25 ტ მასის გამდნარი ლითონის „გუბეს“. სამი სანთურის გამოყენება ამცირებს გადნობის პერიოდს 15 წუთით. 10 თვის მუშაობის შემდეგ ღუმელს პქონდა შემდეგი მანქანებლები: ტექნოლოგიური ელექტრული ენერჯის ხარჯი 442 კვტ.სთ/ტ, დნობის საშუალო ხანგრძლივობა 95 წუთი. საშუალო წარმადობა 88 ტ/სთ, ელექტროდების ხარჯი 6,5 კგ/ტ.

როგორც [83] ნაშრომიდან ჩანს, თანამედროვე ტექნოლოგიით დნობას აწარმოებენ ქაფისებრი წილების ქვეშ. წილის ყენის სისქეა 300—600 მმ. ქაფი, რომელიც წარმოიქმნება წიდაში შეყვანილი ნახშირბადიანი მასალებით, იცავს ცეცხლგამძლე მასალებს და ელექტროდებს. ელექტროდების ხარჯი შემცირდა 2—4-ჯერ. წილის სქელი ფენა იცავს თხევად ლითონს მასში აზოტის გახსნისაგან. იქმნება გრძელ რკალზე მუშაობის პირობები.

აშშ-ში 125 და 160 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის შექმნილია ელექტრორკალური დნობის ახალი ტექნოლოგია შემოკლებული აღდგენითი პერიოდით [84]. გადნობას აწარმოებენ ტრანსფორმატორის მთელი სიმძლავრით. ერთდროულად ღუმელში უბერავენ ჟანგბადს და ნახშირბადის შემცველ მასალებს. ამ ტექნოლოგიის განმასხვავებელი ნიშანი ის არის, რომ დაჟანგვითი წილის მოხდის შემდეგ ქმნიან აღმდგენელ წიდას. ასეთი ორწიდიანი პროცესი უფრო „კლასიკური“ ტექნოლოგიებისათვის არის დამახასიათებელი, თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელები კი ერთი წილით მუშაობენ. ამის მიზეზია მძლავრი აირგამწოვების დაყენება ღუმელებზე. აირების გაწოვისას ღუმელში შეიწოვება დიდი რაოდენობის ჰაერი და მისი ჟანგბადი ზრდის რკინის ქვეჟანგის რაოდენობას წიდაში. ამიტომ აღდგენითი პერიოდის მოვალეობას ასრულებს ციცხეში ლითონის დამუშავება. ამ შემთხვევაში აირების გაწოვის მოწესრიგებით ქმნიან ისეთ პირობებს, რომ ჰაერი

ლუმელში უმცირესი რაოდენობით შეიწოვება. ეს გარემოება ხელს უწყობს აღმდგენელი წილის შექმნას. ლუმელის პერმეტიზაციას ახდენენ ჰაერის ჭავლით. აღმდგენელი წილის ქვეშ ლითონს აჩერებენ მცირე ხნით (40—45 წუთი) და წილის გათხვევადების შემდეგ ლითონს მასთან ერთად უშვებენ ციცხეში. ლითონი და აღმდგენელი წილა იქ კარგად ირევა ერთმანეთში (რამდენჯერმე იზრდება მათი შეხების ზედაპირი), რის შედეგადაც იქმნება ლითონიდან წილაში გოგირდის გადასვლის პირობები. ასეთი დამუშავება წააგავს ლითონის ციცხეში წიდებით დამუშავებას ერთწიდიანი დნობის ჩატარებისას.

ერთწიდიანი დნობის ჩატარებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ციცხეში გადმოსული თხევადი ლითონის დამუხანგველი წილისაგან განცალკევებას [85]. ამ მიზნით 200 ტ ტეჟალობის ლუმელებს გამოსაშვებ ხერელზე გაუკეთეს შიბერული საკეტები. შიბერები ისეთივე მოწყობილობის გაუკეთდა, როგორსაც საჩამოსხმო ციცხვს უკეთებენ: მოსრიალე და უძრავი ცეცხლგამძლე ფირფიტები პიდროამძრავით მუშაობენ. დამატებით მათ აქვთ გამოსაშვები მილი. შიბერების მასალად გამოყენებული იქნა გამდნარი პერიკლაზოქრომიტი. გამოშვების წინ ლუმელს აყირავენებენ ~10°-ით და ხსნიან შიბერს. ლუმელის გადაყირავენება შიბერის გახსნამდე იმიტომაა საჭირო, რომ წილის დონე ლუმელში გამოსაშვებ ხერელის ზემოთ მოხვდეს. გამოსაშვები ხერელი ჟანგბადით იჭრება. გაჭრისას საჭიროა სიფრთხილე, რომ ჟანგბადი არ მოხვდეს შიბერის მოსრიალე ნაწილებს. როგორც კი ლითონი გამოჩნდება, ლუმელს ბოლომდე აყირავენებენ და უშვებენ მთელ ლითონს. წილის გამოჩენისთანავე შიბერს კეტავენ, ციცხვს მოაცილებენ ლუმელს და ისევ ალებენ შიბერს წილის გამოშვებისათვის. წილისა და ლითონის განცალკევების ასეთი ხერხისას ძნელია შიბერის მოსრიალე ზედაპირებიდან გაცივებული წილის მოხსნა მათი ზედაპირის დაუზიანებლად. შიბერის ჩამკეტით მუშაობისას ცხადი გახდა, რომ წილის გამოჩენის შემდეგ მისი ჩაკეტვა 1 წამში ხდება, რაც უზრუნველყოფს ციცხეში ლუმელის დამუხანგველი წილის უმცირესი რაოდენობის მოხვედრას. ახალი გამოსაშვები ხერელიდან ნადნობის გადმოსხმის ხანგრძლივობა შეადგენს 10 წუთს და 4—5 წუთს 20 დნობის შემდეგ. შიბერის საკეტი უძლებს 10—20 დნობას. მის შესაცვლელად საჭიროა 25 წუთი.

ტექნოლოგიური პროცესის მსვლელობისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ლითონური კაზმის ხარისხს.

ზოგიერთი ფირმა თავისი ქარხნებისათვის აწესებს კაზმის ოპტიმალურ შედგენილობას [86]: მძიმე ჯართი — 20 %; საჩამოსხმო

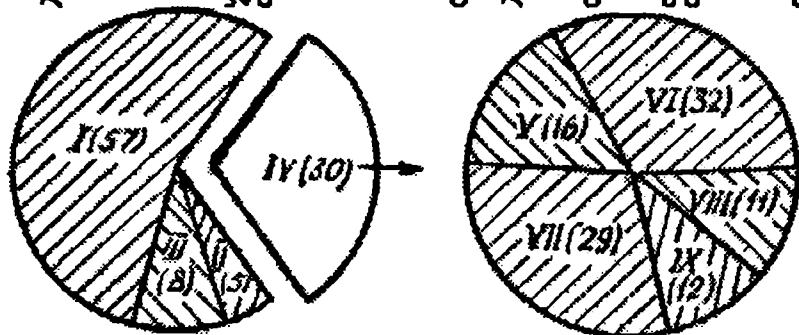
ჯართი – 20 %; ფურცლები ჩამონაჭრები – 25 %; მაღალნახშირბადიანი თუჯის ჯართი – 5 %; დანარჩენი – მსუბუქი და საშუალო წონის ჯართი. მძიმე ჯართის გამოყენებას ზემძლავრ რკალურ ღუმელებში თავისი უარყოფითი მხარეები აქვს: ელექტროდების ხშირი ჩატეხვა, რასაც ხელს უწყობს ღუმელის გარსაცმის მომატებული სიმაღლე; გადნობის დაბალი სიჩქარე, რამაც დნობის გაცივებამდეც შეიძლება მიგვიყვანოს; გრძელ რკალებზე მუქმარობისა და ჟანგბადის გამოყენების ეფექტურობის შემცირება; საწიდე ხერხელის გახსნისა და პირველი სინჯის აღების გართულება დნობისას; საგრძნობი რაოდენობის ლითონის გამოტყორცნები ღუმელიდან. მძიმე ჯართის დადებით მხარეებად ითვლება: მისი სისუფთავე მინარეებისა და გოგირდის მხრივ; რკინის მაღალი შემცველობა და მასთან დაკავშირებული ვარგისი გამოსავლის გაზრდა; ორი კალათის ჩატვირთვა სამის მაგიერად.

საჩამოსხმო ჯართი შემოაქვთ ელექტროფოლადსადნობი და ჟანგბად-კონვერტერული საამქროებიდან. მისი ხმარება გამართლებულია მხოლოდ სიიარყით, სხვა მხრივ იგი ცუდი დენგამტარია (რასაც მოსდევს ელექტროდების გატეხვა), შეიცავს რკინის მცირე რაოდენობას (80–85 %), საგრძნობლად ზრდის წიდის მოცულობას. ამჟამად წიდის რაოდენობა შეადგენს 200 კგ/ტ-ზე, რაც მოითხოვს ელექტროენერჯის დიდ ხარჯს, ჟანგბადის დიდი მოცულობით გამოყენების მოუხედავად. საჩამოსხმო ჯართის გამოყენება ეკონომიურად მაინც უფრო გამართლებულია ჩასატვირთ კალათებში ამატებენ კირს და მლღობ შპატს, რაც ხელს უწყობს წიდის ადრეულ წარმოქმნას. ჯართს ზემოდან აყრიან კოქსის ნარჩენებს, რომლებიც სათბობის მოვალეობას ასრულებენ ჟანგბადით შემბერვისას.

ფოლადის გამოდნობაზე გაწეული გადამუშაების ხარჯების ძირითად ნაწილებს შეადგენს: ელექტროენერჯია, ელექტროდები და ცეცხლგამძლე მასალები (სურ. 10.15). წყლით საცივებელი ელემენტების დაყენების შემდეგ ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი შემცირდა იმ დონემდე, რომელიც აქვთ ჟანგბად-კონვერტერებს, გაიზარდა სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი და შესაბამისად, წარმადობა. ამის გამო დიდი ყურადღება ექცევა გრაფიტის ელექტროდების ხარჯის შემცირებას – ბოლო ხანებში იგი დავიდა 33 კგ/ტ-მდე. შემდგომში წყლით საცივებელი ელექტროდების გამოყენებით მისი ხარჯი კიდევ 20 %-ით შეიძლება შემცირდეს. ელექტროენერჯის ხარჯი დამოკიდებულია ღუმელის წარმადობაზე, წიდის რაოდენობაზე, დნობის გამოშვების ტემპურატურაზე. დამატებითი ენერგეტიკული წყაროების (ჟანგბადი, აირი) გამოყენებაზე, ჯართის ან ღრუბლოვანი რკინის სახეობაზე მართალია.

**ჯამური
დანახარჯები**

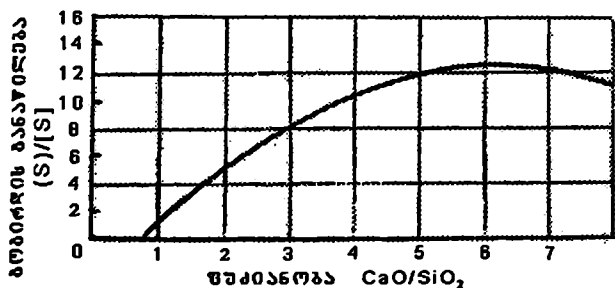
**დანახარჯები
გადამუშავებაზე**



სურ. 10.15. ელექტროფოლადის წარმოებაზე გაწეული ხარჯების სტრუქტურა ფირმა „აისკორის“ (სარ) ქარხანაში: I. ჯართი; II. ამორტიზაცია; III. მალეგირებლები და წილის წარმომქმნელები; IV. ხარჯები გადამუშავებაზე; V. შრომითი დანახარჯები; VI. ელენურგია; VII. ელექტროდები; VIII. ცეცხლგამძლეები; IX. დანარჩენი (არაბული რიცხვები ფრანხილებში - დანახარჯის წილი, %).

წყლით საცივებელი ელემენტების დაყენების შემდეგ უნდა გაზრდილიყო ელექტროენერგიის ხარჯი ფოლადის გამოდნობაზე, მაგრამ წარმადობის გაზრდამ ეს ხარჯები უნდა გადაფაროს. უანგბად-აირის სანთურები ხელს შეუწყობენ ღუმელის „ცივი“ წერტილების გახურებას, რაც შეამცირებს დნობის ხანგრძლივობას.

ჩასატვირთ კალათაში კირის დამატების შედეგად ფოსფორისა და გოგირდის ნაწილი მოშორდება ლითონის პირველი სინჯის აღებამდე. 10.16 სურათზე მოყვანილია გოგირდის



სურ. 10.16. გოგირდის მოშორების დამოკიდებულება ელღუმელების დაჯანგული წილების ფუძიანობისაგან (წილის საშუალო შედგენილობა: 20 % FeO, 9 % MgO, 4 % MnO, 3 % Al₂O₃).

განაწილების კოეფიციენტი (S)/[S] ფუძიანობისგან დამოკიდებულებით. როგორც სურათიდან ჩანს, დნობის ამ პერიოდში წიდაში საკმაოდ დიდი რაოდენობით გოგირდი გადადის.

თუ დნობა უნდა დამუშავდეს ციციხეში TH (ლითონის ციციხეში გაქრევა არგონით მისი ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გაერთგვაროვნებისათვის მთელ მოცულობაში) და VAD (ლითონის ციციხეში დამუშავება მისი გახურებით) პროცესებით, მაშინ გამოიყენება არა კირი, არამედ იაფი დოლომიტი, რომ არ მოხდეს ციციხის ამონაგის ამოჭმა წიდის დონეზე. გამოშვებული ლითონის მაღალი ტემპერატურის გამო.

ცნობილია, რომ რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადი შეიცავს დიდი რაოდენობით აზოტს, თუმცა ჟანგბადით აბაზანის გაქრევა დნობის პროცესში და სქელი წილების არსებობა უზრუნველყოფს აზოტის შემცველობას ლითონში იმ ზღვრებში, რომლებიც მის თვისებებზე არ მოქმედებს. ყველა მარკის ფოლადში, გარდა მაღალნახშირბადიანისა, ნახშირბადის შემცველობა ღუმელში დაჰყავთ 0,08 %-მდე (მდულარა ფოლადებში – 0,05%-ის ქვევით).

ამრიგად, რკალური დნობის ტექნოლოგიური პროცესების სრულყოფას მიეკუთვნება დნობის ხანგრძლიეობის შემცირებისაკენ და ლითონის დაყვანის პროცესების ღუმელსგარე აგრეგატებში გადატანისაკენ. ადრე შექმნილი სქელი ქაფისებრი წიდა ფარავს რკალს, რაც იცავს ამონაგს გადახურებისაგან და ამით ამცირებს გამაცივებელი წყლით წართმეულ სითბოს რაოდენობას (თბურ დანაკარგებს), ეს კი ამცირებს დენის დატვირთვებს ელექტროდებზე. თხევადი ლითონის ციციხეში დამუშავებისათვის აუცილებელია ღუმელის დამუანგველი წიდის განცალკევება ლითონისგან, რისთვისაც სხვადასხვა ხერხს იყენებენ.

დნობის ენერგოტექნოლოგიური რეჟიმები წარმოადგენს ფოლადსადნობი ტექნოლოგიის ძირითად ნაწილს. ისინი ავტომატურად რეგულირდება მათემატიკური მოდელების გამოყენებით, ანდა დნობის მსგელობის დინამიური კონტროლის მეთოდებით. მაგალითად, გამაცივებელი წყლის ტემპერატურით.

ღუმელში თხევადი ლითონის დახალასების (რაფინირების) ჩატარება დამახასიათებელია „კლასიკური“ ტექნოლოგიისათვის. ზემოქვემო რკალური ღუმელების გამოყენების შემთხვევაში ლითონის დახალასების ჩატარება წამგებიან პროცესად ითვლება. ამ პერიოდში გამოიყენებელი რჩება ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, ძნელია კარგი განმუანგველი წიდების შექმნა ($FeO < 0,3-0,5$ %-ზე) და ა.შ. ამ მიზეზების გამო ზემოქვემო რკალური ღუმელების

მუშაობისას „კლასიკური“ ტექნოლოგიის გამოყენება ეკონომიკურად გაუმართლებელია. ზემდღავრი რკალური ღუმელების მუშაობის ეკონომიკის გაუმჯობესების ერთ-ერთ გზას წარმოადგენს თხევადი ლითონის ციციხეში დამუშავება (განუანგეა, გაქრევა, ლეგირება, ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გაერთგვაროვნება, განგოგირდება და სხვ.). ამიტომ თანამედროვე სემპლაერი რკალური ღუმელების დანიშნულებაა ჯართის გადნობა, ხოლო თხევადი ლითონის მთელი შემდგომი დამუშავება გადატანილია ციციხე-ღუმელში. რასაკვირველია, თხევადი ლითონის ციციხეში დამუშავება მხოლოდ რკალური ღუმელის უპირატესობას არ წარმოადგენს. ციციხეში ლითონის დამუშავებისათვის არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს იმას, თუ რომელ ფოლადსადნობ დანადგარში არის გამოდნობილი ლითონი. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებით ფოლადის ხარისხი შეიძლება იმაზე მეტად გავაუმჯობესოთ, ვიდრე ამას თვით ღუმელში მივაღწევდით. ამის საშუალებას იძლევა ლითონის ისეთი ხერხებით დამუშავება, რომელთა გამოყენებაც ზემდღავრ რკალურ ღუმელებში შეუძლებელია ან თითქმის შეუძლებელი (ვაკუუმი, ნახშირბადის შემცველობის 0,02 %-ზე ქვევით დაყვანა და სხვ.). ამიტომ გასაკვირი არ არის, რომ ამჟამად მოქმედი ზემდღავრი რკალური ღუმელების მუშაობა მჭიდროდ არის დაკავშირებული ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებასთან. თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების დანადგარების მოწყობილობა საკმაოდ რთულია, მაგრამ მათზე დახარჯული თანხები მოკლე დროში ნაზღაურდება.

ფირმა „აისკორის“ (სარ) ერთ-ერთ ქარხანაში ადნობენ ლითონს, რომელსაც წაეყენება მკაცრი მოთხოვნები სისუფთავისა და ქიმიური შედგენილობის მხრივ (წყალბადის შემცველობის ჩათვლით). ლითონი ციციხეში მუშავდება აირების გაქრევით და ვაკუუმით. ასეთივე კომპლექსური დამუშავებით გფრ-ში აღწევენ ლითონის ხარისხის მკვეთრ გაუმჯობესებას. ვაკუუმურ დანადგარზე ლითონის გახურებას იწყებენ 40 კპა წნევისას. თვითონ ვაკუუმირებისას კი (ორთქლის გამწოვი 4-საფეხურიანი სისტემა — 80 პა). ნიშნების აღებას და ტემპერატურის გაზომვას ახდენენ ვაკუუმური კამერის გარეთ. დანამატების მიცემა შეიძლება როგორც გახურების, ისე ვაკუუმირებისას. ყველა გამზომი ხელსაწყო მიერთებულია ელექტროგამზომ მოწყობილობასთან და მისი საშუალებით ხდება ყველა პროცესის შესწორება.

თხევადი ლითონის გაქრევის დანადგარი შედგება ქშინისა და მისი გადამადგილებელი ურიკისაგან. გაქრევის შედეგად

გამოყოფილი კვამლი მილგაყვანილობით გაივლის ღუმელის აირგამწმენდის მეორად სისტემას. ფოროვანი ჩანამატები ციცხვის ქვედზე, გაქრევისა და ეაკუმირებისას, საშუალებას იძლევა ჩატარდეს თხევადი ლითონის მრავალნაირი დამუშავება. ფოლადის შედგენილობის გაერთგვაროვნებისა და ტემპერატურის გათანაბრებისთვის (დატკეპნილ ამონაგიან ციცხვებში) გამოიყენება აზოტი. მშვიდი ფოლადების დამუშავებას აწარმოებენ ან გაქრევის და ეაკუმში დამუშავებით. ან ერთდროულად გაქრევა-ეაკუმირებით. აირით ლითონის არევა საშუალებას იძლევა 0,01 %-მდე შემცირდეს გოგირდის შემცველობა ლითონში.

დნობის ტექნოლოგია ღუმელსგარე დახალასებით ისეა აგებული, რომ დნობისას ღუმელში მკვეთრად არ არის გამოხატული ალდგენითი პერიოდი და ლითონი ღუმელიდან გამოდის ერთი წიდის გამოყენებით. თუ ლითონი მოითხოვს დამატებით დახალასებას, მაშინ მას ღუმელში გადაახურებენ. დადგენილია, რომ ღუმელში ლითონის გადახურება უფრო ხელსაყრელია, ვიდრე ეაკუმის დანადგარში, რადგან ღუმელში გადახურებაზე საჭიროა მცირე დრო, რომელიც ანაზღაურდება დახალასებაზე საჭირო დროის შემცირებით. ასეთი ერთგვაროვანი ტექნოლოგიის გამოყენებას მიეყავართ დნობის ხანგრძლივობის მუდმივობისაკენ. გამოდნობილი ფოლადის ხარისხისადმი მოთხოვნების მიუხედავად.

წიდის მოხდას ახორციელებენ $\sim 1550^{\circ}\text{C}$ -სას, ლითონიდან ფოსფორის ჯეროვანი მოშორებისათვის. ეაკუმირებისა და ლითონის გაქრევის შემდეგაც ფოსფორის შემცველობა ფოლადში არ აღემატება 0,01 %-ს, მდულარა ფოლადებში - 0,005 %-ს.

ზემძლავრი რკალური ღუმელების მუშაობის გასაუმჯობესებლად გამოყენებულია აგრეთვე მუდმივი დენი. ლაბორატორიული და მცირე ტევადობის ღუმელის გამოცდის შემდეგ დადგინდა, რომ მუდმივ დენებზე მომუშავე ზემძლავრი ღუმელების გამოყენება გააუმჯობესებს მათ ეკონომიკურ და ტექნიკურ მახასიათებლებს. საფრანგეთში [87, 89] 1985 წელს გაუშვეს მსოფლიოში ყველაზე დიდი ტევადობის მუდმივი დენის რკალური ღუმელი ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 48 მგვ.ა. ღუმელის მუშაობისათვის შემუშავებული იქნა ორი სისტემა: რკალის შემოწმების ორსაფეხურიანი სისტემა და ქვედის ელექტროდი. მუდმივი დენის ღუმელს, ისევე როგორც ცველადი დენისას, გრაფიტის 3 ელექტროდი აქვს. ქვედში აყენებენ 1 ან 3 ელექტროდს. ქვედის ელექტროდების რაოდენობა დამოკიდებულია გამოყენებულ სიმძლავრეზე. ღუმელის გარსაცმის დიამეტრია 5,8 მ, გარსაცმის სიმაღლე - 2,1 მ, ტევადობა 75 ტ. დნობის ნომინალური მასაა 62 ტ. წყლით

საცივებელი პანელების ფართობია 25 მ², კამარის წყლით საცივებელი ფართობი - 20 მ², 3-ე ელექტროდის დიამეტრი ცალცალკე არის 500 მმ., ნომინალური სიმძლავრეა 48 მგვტ, ძაბვა ქსელში - 225/63 კვ, მეორადი ძაბვაა 0/660 ვ. ღუმელი მოთავსებულია ხმაურის დამკვეთებელ ნაგებობაში, მუშაობს აირის 3 სანთურა. ღუმელზე დიდი სიმძლავრის მიყვანისას მუშაობს ქვედის სამივე ელექტროდი, რაც უზრუნველყოფს 120 კა ძალის დენის გატარებას. ცველადი დენის რკალურ ღუმელთან მუდმივი დენის რკალური ღუმელის მუშაობის შედარებისას გამოირკვა, რომ ელექტრული ენერჯისა და ცვეხლგამძლე მასალების ეკონომია მცირეა (ენერჯის ხარჯი გადნობისას შეადგენს ~380 კვტ.სთ/ტ). სამაგიეროდ, ელექტროდების ხარჯი მცირდება 50-60 %-ით, საგრძნობლად კლებულობს ხმაური. შესაძლებელია, რომ დრო გამოშვებიდან გამოშვებამდე დავა 80-90 წუთამდე. ქვედის ელექტროდის, წყლით საცივებელი სისტემისა და ცვეხლგამძლე მასალის შემოწმებამ დაადგინა, რომ ელექტროდის მუშაობის უმცირესი დრო არის 6 თვე. ძირითად უპირატესობად ითვლება მყარი რკალის არსებობა. ცდებით დამტკიცდა, რომ რკალის ციმციმის დონე მუდმივი დენის დროს 10-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე ცველადი დენისას. უმჯობესდება შრომის პირობები. ასე რომ, მუდმივ დენზე გადასვლა წინგადადგმული ნაბიჯია ახალი რკალური ღუმელების დაპროექტებისა და ძველების რეკონსტრუქციისას.

ამრიგად, შეიძლება თვალი ვადევნოთ რკალური ღუმელების მუშაობის განვითარებას ბოლო ათწლეულებში [89]. ამ ხნის განმავლობაში რკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა გაიზარდა თითქმის 3-ჯერ და უფრო მეტად, ვიდრე საერთოდ ფოლადის წარმოება. შეიძლება გამოიყვოს რკალური ღუმელების ოთხი თაობა დნობის ტექნოლოგიის ცვლილებების, მიყვანილი სიმძლავრის დონისა და წარმადობის მიხედვით. პირველი თაობებისათვის (XX საუკუნის 60-იან წლებამდე) დამახასიათებელია ხვედრითი სიმძლავრე 200 კვ.ა/ტ. ღუმელის კედლებს ამოაგებდნენ მაგნეზიტით, დოლომიტით ან ნახშირბადის შემცველი მასალების ბლოკებით. კამარების მუყავე ამონაგი შეცვალეს თიხიანით. განფოსფორებას და გაუნახშირბადოებას აწარმოებდნენ რკინის მადნით ან რკინის ხენჯით. დნობის ხანგრძლივობა შეადგენდა 4-6 საათს, წარმადობა - 15-25 ტ/სთ 100 ტ ტევადობის ღუმელებისათვის. ცვეხლგამძლე მასალების დიდი ხარჯი და მათი დაბალი თბომედეგობა გახდა იმის მიზეზი, რომ რკალურ ღუმელებს გამოიყენებდნენ უმთავრესად ძვირად ღირებული და სპეციალური ფოლადებისა და შენადნობების გამოსადნობად.

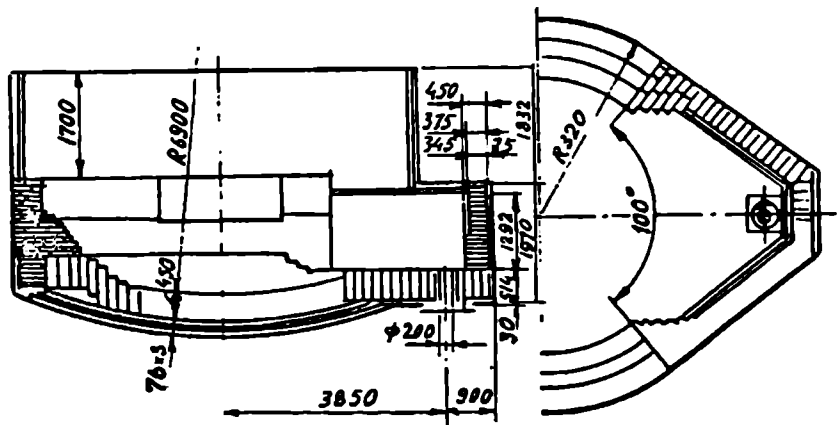
XX საუკუნის 60-იანი წლების დასაწყისში გამოჩნდა მეორე თაობის, დნობის ბოლოსათვის დაბალ ძაბვებზე მომუშავე (ამონაგი რომ არ დაეზიანებინათ) სემპლავრი რკალური ღუმელი. ამ დროს ღუმელები მუშაობდნენ დიდი რეაქტიული ელექტროწინალობით. მიყვანილი სიმპლავრე იყო 400–500 კვ.ა/ტ. ასეთი სიმპლავრის გამოყენებისას საშიში იყო ღუმელის ამონაგის სწრაფი ამოწვა. მაშინ ამცირებდნენ ელექტროდების განშლის დიამეტრს. რათა ელექტროდები ღუმელის კედლიდან დაეშორებინათ. დიდ სიმპლავრეზე მუშაობა რომ ტექნიკურად შესაძლებელი და ეკონომიკურად გამართლებული ყოფილიყო, საჭირო გახდა ახალი სახის ელექტროდი – დაბალი ელექტროწინალობით (600 მმ დიამეტრისა 70–80 კადენის ძალისათვის შეიქმნა 1963 წელს) და დნობის განმავლობაში იმ ტექნოლოგიური ოპერაციების (ჩატვირთვა, წიდის მოხდა, ტექნიკური რემონტი და სხვ.) ხანგრძლივობის შემცირება, რომლებიც ითხოვენ ძაბვის გამორთვას ანუ იწვევენ ღუმელის მოცდენას.

რკალურ ღუმელებში დაიწყეს ნახშირბადიანი ფოლადების გამოდნობა. რკალური ღუმელები უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანებთან (დანადგარებთან) ერთად გახდნენ „მცირე“ ქარხნების ძირითადი აგრეგატები. 60-იანი წლების ბოლოს 100 ტ ტევადობის ღუმელების წარმადობამ მიაღწია 30–40 ტ/სთ. დნობის ხანგრძლივობამ – 2,5–3,5 საათს, ზოგიერთ ღუმელზე კი – 40–70 ტ/სთ-ს დნობის ხანგრძლივობით 2 საათი. ამ ღუმელებისათვისაც წარმადობის გაზრდის შემზღვეველ მიზეზად ითვლებოდა ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი და გაცდენები შეკეთებებზე. 70-იან წლებში ტექნოლოგიურ პროცესებში შეიტანეს აბაზანის გამუდმებული არევა ლითონური კაზმის მომზადებასთან ერთად გადნობის დასაჩქარებლად და სასურველი შედგენილობის ფოლადის მისაღებად. გაიზარდა გამოყენებული აიროვანი ჟანგბადის რაოდენობა, კაშში სათანადოდ ნახშირბადის დამატებით; ერთმანეთს დაამთხვიეს გაუნახშირბადეობისა და განფოფორების პროცესები გადნობის პერიოდის ბოლოსთვის. გამოყენებულ იქნა აირ-ჟანგბადის სანთურები. წიდის გადასახალისებლად იხმარებოდა ინჟექტორება (თხევად ლითონში ფხვნილისებრი მასალების შეხერვა) კირის შესაყვანად. შეიქმნა ღუმელის კედლების წყლით საცივებელი პანელებით ამოგების ახალი ტექნოლოგია. ღუმელის წარმადობა 50–70 ტ/სთ-მდე გაიზარდა, დნობის ხანგრძლივობა გახდა 1,5 საათი. ეს არის მესამე თაობის რკალური ღუმელები. ხვედრითი სიმპლავრით 600–800 კვ.ა/ტ, გარსაცმის დიამეტრით – 6,2–6,8 მ. ღუმელის თაღში გაკეთდა მეოთხე და მეხუთე ნახვრეტები აირების გასაწოვად და კაზმის დასამატებლად. 80-იანი წლების შემდეგ

გამოიკვეთა მეოთხე თაობის ღუმელების განვითარების შემდეგი გზები: ხვედრითი სიმძლავრე 800–1000 კვ.ა/ტ, პროცესების ავტომატიზაციის სისტემების, ციცხეში თხევადი ლითონის დამუშავების პროცესების, გამომავალი აირებისა და წილის სითბოს გამოყენება და სხვ. რკალური ღუმელების წარმადობის გაზრდას დიდად შეუწყო ხელი ღუმელიდან თხევადი ლითონის გამოშვების ტრადიციული ხერხის შეცვლამ. 1981 წელს გფრ-ში ერთ-ერთ ქარხანაში გაუშვეს 110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელი ლითონის გამოშვებით ქვედიდან [90]. ღუმელი დაყენებული იქნა მარტენის საამქროში და მან შეცვალა 120 ტ ტევადობის მარტენის 4 ღუმელი და 50 ტ ტევადობის 1 რკალური ღუმელი. ეს ერთღუმე-ლიანი საამქრო გამოირჩეოდა იმ დროისათვის უახლესი დანადგარებით, ტექნოლოგიით, დანახარჯების ეფექტიანობით. კომპიუტერული შემოწმებით. ქვედიდან ლითონის გამოშვება გაკეთებული იყო იმ მიზნით, რომ გაეზარდათ წყლით საცივებელი ფართობი ღუმელის კედლებზე. წყლით საცივებელი ელემენტები განლაგდა წილის ზედაპირიდან 300 მმ-ის დაშორებით და მოიცვა ღუმელის კედლების ~90%. ასეთმა გადაწყვეტამ გამორიცხა ღუმელის გადაყირავება ლითონის გამოშვებისათვის და იგი გადაიქცა კეპისტაციონარულ დანადგარად. ლითონის ღუმელიდან გამოშვების ხანგრძლივობა მკვეთრად შემცირდა – გახდა 90–120 წამი 110 ტ ტევადობის ღუმელისათვის. ჩამოსხმისა და ციცხეში გაქრვის სამწუთიანი განმავლობაში ფოლადის ტემპერატურა მცირდებოდა 10–20 °C-ით (დამოკიდებულია ციცხვის გახურების ტემპერატურაზე). ქვედიდან ლითონის გამოშვების გამო იზრდება ღუმელის კედლებისა და ქვედის მედეგობა 50 ტ ტევადობის ღუმელისათვის 221-დან 1473 დნობამდე. ცეცხლგამძლე მასალის ხარჯი შემცირდა 5,9-დან 1,1 კგ/ტ-მდე. ღუმელის კარიბჭე (პორტალი) ელექტროდებისა და ელექტროდების დაიჭერებთან ერთად ნადნობის გამოშვებისას აღარ გადაიხრება.

ასეთი სახის ღუმელების განვითარების შემდეგ ნაბიჯს წარმოადგენს ქვედიდან ლითონის ექსცენტრული გამოშვება. ასეთმა გადაწყვეტამ შესაძლებელი გახდა [91] გადაეყვანათ საამქრო, რომელშიც იდგა 100 ტ ტევადობის რკალური 2 ღუმელი ერთი უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანით, ერთ ზემძლავრ რკალურ ღუმელზე ლითონის ექსცენტრული გამოშვებით, ერთი ციცხე-ღუმელით, საამქროს წარმადობის შეუცვლელად. რკალური ღუმელი ასრულებს მარტო ლითონის გადნობის ოპერაციას; დნობის ხანგრძლივობაა 88 წუთი. ერთდროულად მცირდება ელექტროდების, ცეცხლ-გამძლე მასალის, ელექტროენერჯის ხარჯი 1 ტ ვარგის ნამზადზე.

დანის ერთ-ერთ ქარხანაში [92] შეჯამებულ იქნა 18 თვის მუშაობის შედეგები საამქროსათვის, სადაც იდგა 100 ტ ტევაღობის ზემდღაერი რკალური 2 ღუმელი სათბობ-ჟანგბადის სანთურებით, კედლებისა და კამარის წყლით საცივებელი პანელებით და ლითონის ექსცენტრული გამოშვებით (სურ. 10.17) ლითონის დახალასება ხდებოდა ციციხეში. ამის გამო განსრახული იქნა ლითონის გამოშვება უწილოდ. ღუმელზე გამოიყენება წყლით საცივებელი პანელების 3 რიგი. სპილენძისაგან დამზადებული ქვედა პანელების რესურსი 10-ჯერ უფრო მაღალია, ვიდრე ფოლადისა (უკანასკნელების მედეგობა აღწევს რამდენიმე ასეულ დნობას). ღუმელის



სურ. 10.17. ლითონის ექსცენტრული გამოშვება ღუმელის ქვედიდან (დანია)

ქვედი ამოგებულია ფისიანი დოლომიტით. დნობის ტექნოლოგიით გათვალისწინებულია ღუმელში ~15 ტ თხევადი ლითონის დატოვება. პირველ ხანებში ეშინოდათ ქვედის გაფუჭებისა. რის გამოც დღე-ღამეში ერთხელ მაინც გამოუშვებდნენ ფოლადს მთლიანად. ამჟამად დადგენილია, რომ ასეთი ოპერაცია კვირაში ერთხელ უნდა გაკეთდეს. ლითონის გამოსაშვები ხერეღის მედეგობაა ~200 დნობა, გრაფიტის რგოლებისა (ტორსულ გარე ნაწილში) – 20–30 დნობა. გამოსაშვები ხერეღის შეცვლას სჭირდება 2 საათი. რგოლებისას – 20–30 წუთი. ღუმელის წყლით საცივებელი ფართობის გაზრდამ 70-დან 85 %-მდე ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი ~2-ჯერ შეამცირა. ჩამოსხმისას საგრძნობლად შემცირდა აირების ხსნადობა თხევად ლითონში.

დიდი სამუშაოებია ჩასატარებელი ახალი, ტექნოლოგიური ე.წ. „ტაშეური“ ანუ „უწყვეტი“ პროცესის პრაქტიკაში დასანერგად

[93-96]. ეს პროცესი ეხება მხოლოდ კაზმის ღუმელში ჩატვირთვის მეთოდს. ღუმელში კაზმის უწყვეტი ჩატვირთვის პროცესი შეიძლება განხორციელდეს კაზმის გახურებით გამოშავალი აირების სითბოს ხარჯზე და დამატებით გახურებით სათბობის წვის სითბოს გამოყენებით. კაზმის გახურების ხარისხის მიხედვით. ღუმელის წარმადობა შეიძლება გაიზარდოს 40, 85 ან 150 %-ით. უწყვეტი ჩატვირთვის განსახორციელებლად საჭიროა სპეციალური მოწყობილობა დანატროვანებული კაზმის ან მეტალიზებული ნედლეულის ღუმელში ჩასატვირთად. კაზმის გახურება ხდება მისი ღუმელში მიწოდების გზაზე (მიეწოდება ლითონის-ლენტისანი კონვეიერით), გამოშავალი აირების მიმართულების საპირისპიროდ. კაზმის უწყვეტი ჩატვირთვისას ღუმელი განუწყვეტლივ მუშაობს მთლიან ელექტრულ სიმძლავრეზე 5-7 დღის განმავლობაში ლითონის პერიოდული გამოშვებით ციკლებში და ჯართის გამუდმებული მიწოდებით თაღში გაკეთებული ნახვრეტებიდან. წიდის წარმომქმნელი ფხენილისებრი და ნახშირბადის შემცველი მასალები, აგრეთვე ჟანგბადი მიეწოდება ქშინებით, რომლებიც შედიან ტანგენციულურად ღუმელის კედლებიდან. ღუმელში აწარმოებენ: ტემპერატურული რეჟიმის მართვას და გაუნახშირბადოების, განფოსფორების და ნაწილობრივ განგოგირდების პროცესის მოწესრიგებას, წიდის მოხდას სპეციალური მანქანებით და აგრეთვე დნობის მსვლელობისას ფოლადში შემავალი ნივთიერებების რაოდენობის სასურველ ფარგლებამდე დაყვანის კონტროლს. ღუმელიდან უშვებენ გადაჟანგულ ლითონს 40-50 წუთის შუალედით. გამოშვება წარმოებს 2-3 წუთში, მჭიდრო ჭავლით, უწიდოდ. ღუმელი მუშაობს 6-7 დღის შუალედით. ამის შემდეგ ღუმელს აჩერებენ ამონაგის შეკეთებისათვის. უკეთესია, თუ ნამუშევარი ღუმელის გარსაცმს (გაცვეთილი ამონაგით) ან მის ზედა ნაწილს შეეცვლით წინასწარ დამზადებული კვანძებით. იმ შემთხვევაში, თუ განფოსფორება სრულად არ მოხდა, მაშინ ახდენენ თხევადი აბაზანის გაქრევას აიროვანი ჟანგბადისა და ფხენილისებრი კირით. ამავე დროს უნდა მოიხადოს წიდა. წიდის სრულ მოხდას უზრუნველყოფს სპეციალური მოწყობილობა. ღუმელზე დაყენებულია დანადგარი, რომლის საშუალებითაც შეიძლება თხევად აბაზანაში შეიყვანონ ნახშირბადი, ჟანგბადი, კირი, წიდის ასაქაფებელი მასალები. ამას აკეთებენ ღუმელში ტანგენციულურად შეყვანილი მოსახსნელი ქშინით. ქშინი მიიყვანება ან წიდისა და ლითონის გამყოფ ზედაპირზე, ან აბაზანის დონეზე. რადგან ქშინი კეთდება მოსახსნელი, ამიტომ მისი გაცვეთილი ნაწილების გამოცვლა შეიძლება ღუმელის გარეთ, მისი გაჩერების

გარეშე, დნობის პროცესის შეუწყვეტლად. ასევე ღუმელის გაუჩერებლად შეიძლება თხევადი ლითონის გამოშვება ღუმელიდან. ლითონის განუანგვასა და დახალასებას ანუ ლეგირებას (ყოლაადის დამუშავებისათვის განკუთვნილ ციციხეში) აწარმოებენ როგორც უშუალოდ გამოშვებისას, ასევე უფრო რთული პროცესის გამოყენებით. მაგალითად, განუანგვა და ლეგირება შეიძლება უშუალოდ ლითონის გამოშვებისას. ლითონის სისუფთავისათვის და ქიმიური შედგენილობისა და ტემპერატურის გათანაბრებისათვის იყენებენ ციციხეში ლითონის გაქრევას ინერტული აირით. ნახშირბადიანი და მცირედლეგირებული ფოლადის გამოდნობისას მისი გადახურება ღუმელში საჭირო არ არის. სპეციალური დანიშნულების ფოლადების დნობისას შესაძლებელია შეიქმნას გამახურებელი ციციხეები რთული დასახალასებელი პროცესებისათვის. ჩვეულებრივი და „უწყვეტი“ პროცესების შედარებისას (უწყვეტი პროცესისას აღებულია ცივი, 500 °C და 900 °C-მდე გახურებული ჯართი) დადგინდა, რომ წლიური წარმადობა განისაზღვრება ტრანსფორმატორის სიმძლავრით, ღუმელის ტევადობით და ჯართის გახურების ხარისხით. მაგალითად, წელიწადში 450 ათასი ტონა ფოლადის მისაღებად უწყვეტი პროცესით ჯართის 500 °C-მდე გახურებისას საჭიროა 50 ტ ტევადობის ღუმელი ტრანსფორმატორით 30 მგვ.ა, ხოლო 900 °C-მდე გახურებისას 30 მგვ.ა ტრანსფორმატორიანი 70 ტ ტევადობის ღუმელით შეიძლება მივიღოთ 600 ათას ტონაზე მეტი წელიწადში. ჯართი ღუმელში მიეწოდება ზემოდან, ხვიშირებიდან (ბუნკერებიდან) საკონტინერო გვირაბით. სადაც იგი მოძრაობს უჟანგბადო ატმოსფეროში, ღუმელიდან გამომავალი ცხელი აირების საწინააღმდეგოდ. ჯართის 500 °C-მდე გახურებისათვის საჭიროა დამატებითი გათბობა სანთურებით 15 მ³/ტ-ზე აირის ხარჯით, 900 °C-მდე გასახურებლად – 30 მ³/ტ. წელიწადში 500 ათასი ტონა წარმადობის საამქროს უწყვეტ პროცესზე გადასვლისას წლიური ეკონომიკური ეფექტი გამოთვლებით უნდა იყოს 11,2 მლნ დოლარი. უწყვეტ პროცესზე შეიძლება გადაყვანილი იქნეს როგორც მომუშავე ღუმელები, ასევე მუდმივი დენის რკალური და კერამიკულ-ტიგელიანი პლასტური ღუმელები. ცხრილში 10.11 მოყვანილია უწყვეტი პროცესით მომუშავე ღუმელის ტექნიკური მაჩვენებლები.

დაგეგმილია 5 მ დიამეტრის რკალური ღუმელის გადაკეთება უწყვეტი პროცესისათვის (დარლინგტონი, აშშ) 10 თვის მანძილზე. მიიჩნევენ, რომ ღუმელის წარმადობა გაიზრდება 2-ჯერ და წელიწადში მიაღწევს 390 ათას ტ, ღუმელის გამოთვლილი სამუშაო მარაგით 7500 სთ. ჯართის 900 °C-მდე გახურებისას ელექტროენერჯის ხარჯმა უნდა შეადგინოს ~280 კვტ.სთ/ტ-ზე.

უწყვეტი პროცესით მომუშავე ჯაშუერი ღუმელის ტექნიკური მანევრებლები

საერთო პროცესი	წარმადობა თხევადი ლითონის მიხედვით (ტ/მგე.ასთ)
უწყვეტი პროცესი	1,1
ცივ ჯართზე	1,5
500 °C-მდე გახურებულ ჯართზე	2,0
900 °C-მდე გახურებულ ჯართზე	2,8

საერთოდ, მოყვანილი მონაცემებით, უწყვეტი პროცესისას ელექტროენერჯიის ხარჯი მცირდება – 30 %-ით, ელექტროდებისა – 40 %-ით, შრომისა – 60 %-ით, ანუ მთლიანად 25 აშშ დოლ/ტ-მდე. კაზმად გახურებული მეტალიზებული ნედლეულის გამოყენებისას, უწყვეტი პროცესი საშუალებას იძლევა შემცირდეს კაპიტალური დაბანდებები წარმოების ორგანიზაციაზე აშშ 25 დოლ/ტ-მდე.

მეცნიერული მიღწევების დანერგვა ფოლადის წარმოებაში თანამედროვე პირობებში შეუძლებელია კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენების გარეშე. სემპლარირი რკალური ღუმელების მუშაობის ეფექტურობა მოითხოვს კომპიუტერული მართვის გამოყენებას წარმოების ყველა ეტაპზე, დაწყებული კაზმის ოპტიმალური შერჩევით და დამთავრებული ღუმელის მუშაობის სინქრონიზაციით უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანასთან.

ამრიგად, ყველა ტექნიკური და ტექნოლოგიური მიღწევის გამოყენებით იქმნება შესაძლებლობა, რომ ნემპლარირი რკალური ღუმელის წარმადობამ მიაღწიოს 1 მლნ ტონა ვარგის ფოლადს წელიწადში [97].

ბოლო ხანებში გამოთქმულია მოსაზრებები, რომ ღუმელის მუშაობის ეკონომიკური მანევრებლების გაუმჯობესებისათვის საჭიროა მის მუშაობას სხვა თვალითაც შევხედოთ. მოყვანილია შემდეგი მოსაზრება [98]: ტრადიციული რკალური ფოლადსადნობი ღუმელი პროექტდებოდა და გამოიყენებოდა მთავარი მიზნისათვის – ღუმელის მაქსიმალური წარმადობის მისაღწევად. ამჟამად მიზანს წარმოადგენს ფოლადის წარმოება მინიმალური დანახარჯებით. ეკონომიურად მომუშავე რკალური ფოლადსადნობი ღუმელების მუშაობის ანალიზის საფუძველზე მოყვანილია დამოკიდებულება ღუმელის ძირითად მახასიათებლებსა და ტონებში ტვეადობას შორის. იგი ტოლია $0,406d^3$, სადაც d ღუმელის გარსაცმის დიამეტრია მეტრებში. ღუმელის წლიური წარმადობა (ტონა) $P=14,36d^3h/t$, სადაც h ღუმელის მუშაობის დროა წელიწადში (სთ); t დნობის ხანგრძლივობაა (წთ); როდესაც ღუმელი

მუშაობს დროის 80 %-ს, $h \approx 7000$ სთ და $P = 17,05 \cdot 10^4$ დ³/ლ. გადნობის პერიოდში ღუმელი მოითხოვს 15 %-ით მეტ ტრანსფორმატორის საშუალო სიმძლავრეს. როდესაც სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos \varphi = 0,7$, საშუალო სიმძლავრეს შეადგენს $1,15 W \cos \varphi$ ანუ $0,805 W$, სადაც W ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრეა, მგე.ა. 25 % დანაკარგებისას ჯართამდე მისული სიმძლავრე $E = 0,615 W$. მაშინ დნობის ხანგრძლივობა (წთ) $t_{\text{წ}} = 0,244 \text{ d}^3 / E$, სადაც e ჯართის გადნობაზე დახარჯული ენერჯიაა. როდესაც საშუალო $e = 380$ კვტ.სთ/ტ, მაშინ $t_{\text{წ}} = 9,26 \text{ d}^3 / E$; ანდა $t_{\text{წ}} = 15 \text{ d}^3 / W$. ბოლო დამოკიდებულებას შეიძლება აქონდეს შემდეგი სახე: $t_{\text{წ}} = 37000 / W$, სადაც $W = 1000 W / 0,406 \text{ d}^3$, კვ.ა/ტ.

თ ა ვ ი III

მცირე ქარხნები

მცირე, ანუ, როგორც მათ უწოდებენ, „მინი“ ქარხნები, წარმოიქმნა ~50 წლის წინათ. მათი წარმოქმნა დაკავშირებულია ზემოქმადური რკალური ღუმელების განვითარებასთან. მცირე ქარხნებს არ გააჩნიათ ბრძმელები. მათ უმთავრესად იქ აშენებენ, სადაც ბევრია ლითონური ნარჩენები (დიდი სამანქანათმშენებლო ქარხნების ახლოს). ისინი აკმაყოფილებენ მარტო ადგილობრივ მოთხოვნებს ფოლადზე. ასეთი ქარხნები პირველად განვითარებულ კაპიტალისტურ ქვეყნებში შეიქმნა, ამჟამად კი მათ გზას განვითარებადი ქვეყნებიც მიჰყენენ. ისინი მცირე ქარხნებში ამუშავებენ საკუთარი წარმოების მეტალიზებულ ნედლეულს. მცირე ქარხნების წარმადობა არ აღემატება 1,5 მლნ ტონა ფოლადს წელიწადში. უფრო ხშირად მათი წარმადობაა 400—600 ათასი ტონა წელიწადში. რადგან მცირე ქარხნები ბოლო პერიოდშია შექმნილი, ამიტომ ისინი აღჭურვილია უახლესი ტექნიკით და მუშაობენ თანამედროვე ტექნოლოგიებით. მათი საბოლოო პროდუქციის სახეობები მკვეთრად შეზღუდულია და ძირითადად უშვებენ სამშენებლო მასალას: თუმცა ბოლო ხანებში ასეთ ქარხნებში დაიწყეს მალალხარის-ხოვანი ფოლადის მიღებაც. მცირე ქარხნების ერთ-ერთ უპირატესობად ითვლება მომხმარებლისადმი ლითონის მცირე პარტიებად მიწოდების შესაძლებლობა. დიდი ქარხნები ასეთი შეკვეთებით არ არიან დაინტერესებული, რადგან ძნელია ქარხანა ამუშაო უამრავ შეკვეთაზე. მცირე ქარხნები კი თავისი ტრანსპორტით (უმთავრესად ავტოტრანსპორტით) უზრუნველყოფენ მიმდებარე

რაიონების მცირე შეკვეთებს. მცირე ქარხნების მუშაობის მოქნილობამ განაპირობა მათი სწრაფი განვითარება, და 80-იანი წლების დამდეგისათვის აშშ-ში მთლიანი წარმოებული ფოლადის 16 % მცირე ქარხნებზე მოდიოდა. სხვა ქვეყნებში, მაგალითად, იტალიაში ამ წილმა 30 %-საც კი მიაღწია. 1980 წლისათვის 240 ასეთი ქარხანა მოქმედებდა 42 ქვეყანაში და უშვებდა მსოფლიოში წარმოებული ფოლადის 6 %-ს. ამჟამად მათი წილი კიდევ უფრო გაიზარდა.

რით შეიძლება აიხსნას მცირე ქარხნების ასეთი განვითარება? განვითარებად ქვეყნებში ეს არის საკუთარი ბაზრის შეხელუდული მსყიდველუნარიანობა, რასაც გარკვეულად აკმაყოფილებს. განვითარებულ ქვეყნებში – ესაა მცირე ქარხნებისათვის საჭირო დაბალი საერთო და ხვედრითი კაპიტალური დაბანდებები მშენებლობაზე და მათი დიდი კონკურენციის უნარი.

ისე არ უნდა გავიგოთ, თითქოს მცირე ქარხნების მშენებლობის განვითარება გამორიცხავდეს სრული მეტალურგიული ციკლის ქარხნების (ბრძმედი და ჟანგბად-კონვერტერი) განვითარებასა და მშენებლობას. დადგენილია, რომ თუ სრული ციკლის ქარხნის წარმადობა ნაკლებია 5–6 მლნ ტონაზე წელიწადში, მაშინ მისი მშენებლობა ტექნიკურად და ეკონომიკურად წამგებიანია. მაგალითად, 3 მლნ ტონა წლიური წარმადობის სრული ციკლის ქარხნის მშენებლობა 80-იანი წლებისათვის ფასდებოდა 4–5 მილიარდ დოლარად. მოგებას ასეთი ქარხანა იძლეოდა მუშაობის დაწყებიდან 5–6 წლის შემდეგ, მშენებლობას კი უნდებოდა 8–10 წელი. ამრიგად, კაპიტალური დაბანდებების დიდი რაოდენობა საკმაოდ დროით უქმად ცდებოდა. მცირე ქარხნების მშენებლობა და საწარმოო სიმძლავრეების ათვისება 1.5–2 წელიწადს გრძელდება რის გამოც მცირე ქარხნები მოგებას იძლევიან უკვე მაშინ, როცა სრული ციკლის ქარხნების მშენებლობა იწყებს გაშლას. შედარებისათვის ავიღოთ სრული ციკლის ქარხანა 3–6 მლნ ტონა წლიური წარმადობით და მცირე ქარხანა 250–500 ათასი ტონა წლიური წარმადობით. ეკონომიკური ეფექტიანობა, დროის ფაქტორის გათვალისწინებით, გვიჩვენებს, რომ მცირე ქარხნებისთვის 1 ტ ნაგლინზე მოსული კაპიტალმოცულობა 55–60 %-ით უფრო ნაკლებია, ვიდრე სრული ციკლის ქარხნისათვის. ჯამური დანახარჯები, მიუხედავად უფრო დიდი საექსპლუატაციო ხარჯისა, მცირე ქარხნებში უფრო ნაკლებია 3–12 %-ით.

მცირე ქარხნების მშენებლობის განვითარებამ გამოიწვია სპეციალურად მათთვის დანადგარებისა და ტექნოლოგიების შექმნა. ასეთი ქარხნები დამატებით არ მოითხოვენ დიდ ფართო-

ბებს, რასაც გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება მათი მშენებლობისათვის იმ ადგილებში, სადაც ძლიერ არის განვითარებული სამანქანათმშენებლო წარმოება.

როგორც გამოკვლევებით დადგინდა [99], 1977 წლიდან ყველაზე დიდმა ფირმებმა დახურეს ან გაყიდეს ქარხნების ~20 %. მაშინ, როცა მცირე ქარხნების რაოდენობა სწრაფად გაიზარდა. ზოგიერთი ავტორი ფიქრობდა, რომ 2000 წლისათვის მცირე ქარხნები 40 %-ით დააკმაყოფილებდნენ მსოფლიოს მოთხოვნას ფოლადზე. თანამედროვე მცირე ქარხნები აღჭურვილია უახლესი ტექნიკით: ეკონომიური რკალური ღუმელები და უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანები. მომავალში, როცა უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე ჩამოსხმება 38 მმ-ის სისქის სლაბები, შესაძლებელი იქნება სრული ციკლის ქარხნებში წარმოებულზე 20 %-ით იაფი ფურცლოვანი ნაგლინის დამზადება. მცირე ქარხნებში გამარტივებულია წარმოების მართვა. ფირმა „Nvwz Corp“-ის მცირე ქარხნებში ადმინისტრაციული სამტატო ერთეული სულ 15 კაცია. ხელფასის ხარჯები მცირე ქარხნებში 75-100 დოლარია 1 ტ ფოლადზე, ხოლო სრული ციკლის ქარხნებში - 185-290 დოლარი. მცირე ქარხნების წარმადობას ზღუდავს ჯართის მარაგი, მაგრამ იგი თავისუფლად შეიძლება შეიცვალოს რკინის მადნისაგან მსგავსი მასალების გამოყენებით.

მცირე ქარხნები ყველაზე სწრაფად განვითარებადი მიმართულებაა ფოლადის წარმოების სფეროში. მაგალითად, აშშ-ში 1985 წლისათვის 60 მცირე ქარხანა მუშაობდა და დნებოდა მოკლი გამოდნობილი ფოლადის ~20 %.

ელექტროფოლადსადნობი საამქროს მუშაობის ანალიზი ჩაატარეს ფირმა Krupp Suedwestfolen AJ ქარხნებში [100]. ერთ-ერთ საამქროში იდგა 110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელი, ტრანსფორმატორით 75 მგვა, სათბობ-ჟანგბადის სანთურებით, წყლის საცივებელი კედლებითა და კამარით, უწყვეტი ჩამოსხმის ნდარიანი და ციცხეში თხევადი ლითონის დამახალასებელი (ლევირება, ვაკუუმირება, არევა, არგონით გაქრევა) დანადგარებით. გაარჩიეს სხვადასხვა სახის კაზმზე (ჯართზე, ღრუბლოვან რკინაზე, ჯართის და მეტალიზებული გუნდების ნარევეზე) მუშაობისას ტექნოლოგიის გავლენა დნობაზე: ლითონის გამოშვება ღუმელიდან (წიდასთან ერთად მისი შემდგომი მოხდით ციცხვიდან; წიდასთან ერთად ლითონის შემდგომი გადასხმით სხვა ციცხეში საჩერის გამოყენებით; წიდის ღუმელში დატოვებით); ციცხეში ლითონის დამუშავება. განიხილეს ყველა ამ ღონისძიების გავლენა საამქროს მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე დადგინდა, რომ

რკალურ ღუმელში დნობის ტექნოლოგია და მისი ციცხვეში გადა-
მუშავება საშუალებას იძლევა გაიზარდოს დანადგარის წარმადობა
72-დან 85 ტ/სთ-მდე. შემცირდეს ენერგიის ხარჯი ღუმელზე
30–50 კვტ.სთ/ტ-ზე და ენერგიის ჯამური ხარჯი – 10–30 კვტ.სთ/ტ-ზე.
შემცირდეს ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი 10–30 %-ით, გაუმ-
ჯობესდეს გამოშვებული ლითონის ხარისხი.

მცირე ქარხნების უპირატესობამ სრული მეტალურგიული
ციკლის ქარხნებთან შედარებით, რაც გამოიხატებოდა ხვედრითი
კაპიტალური დაბანდების სიმცირით და მოქნილი ტექნოლოგიით,
გამოიწვია მათი მშენებლობის სწრაფი განვითარება და 1984
წლისათვის მათმა რიცხვმა მიაღწია 330-ს, ხოლო წარმადობამ –
607 მლნ. ტონას წელიწადში [101]. სხვა ფოლადსადნობ ქარხნებთან
კონკურენტუნარიანობის ასამაღლებლად მცირე ქარხნებში 1980
წლიდან დაწერდნენ იქნა ტექნოლოგიის გაუმჯობესების თითქმის
ყველა მიღწევა. გაიზარდა ღუმელში შეყვანილი ელექტროენერ-
გიის სიმძლავრე (700 კვ.ა/ტ და მეტი), რამაც შესაძლებელი
გახდა დნობის ხანგრძლივობის მკვეთრი შემცირება. თავის მხრივ
ამ მოვლენამ ბიძგი მისცა ღუმელის კედლისა და თალის წყლით
საცივებელი ელემენტების გაუმჯობესებას. გარეთა გამაცივებელი
პანელების გამოყენებამ გაზარდა ღუმელის სასარგებლო
მოცულობა 30 %-ით. ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი შემცირდა
50 %-ით. თანამედროვე ღუმელებზე ცეცხლგამძლე მასალების
ხარჯი (ციცხვის ამონაგის ჩათვლით) შეადგენს ~1.8 კვ/ტ-ზე.
ღუმელიდან გამოყვანილი აირები (ტემპერატურით 600–1200 °C)
გამოიყენება კაზმის გასახურებლად 250–350 °C-მდე. გახურებული
კაზმის გამოყენებამ შეამცირა 1 ტონა ფოლადის წარმოებისათვის
საჭირო ელექტროენერგიის ხარჯი 35 კვტ.სთ-ით, ნავთობის ხარჯი
– 1,5 კგ-ით, ჟანგბადის ხარჯი 3 მ³-ით. შემცირდა დნობის ხანგრძ-
ლივობა 5–7 წუთით.

ამჟამად რკალური ღუმელი გამოიყენება მხოლოდ ჯართის
გასადნობად. დნობის დახალასებისა და ლეგირებისათვის გამო-
იყენება ციცხვ-ღუმელი, რომელიც დახურულია ელექტროდებიანი
კამარით, სითბოს დანაკარგების შემცირების მიზნით. დნობა
ციცხვ-ღუმელში მუშავდება არგონით ან აზოტით. ციცხვ-ღუმე-
ლის გამოყენებით შეიძლება გაიზარდოს ღუმელის წარმადობა
25 %-ით, 10 %-მდე დაიზოგოს ლითონში მიცემული მასალები. შემცირდეს
1 ტ ფოლადზე დახარჯული საერთო ენერგია 35 კვტ.სთ-ით და
ელექტროდების ხარჯი 0,8 კგ-ით. ასეთი ღონისძიებების ჩატარებით
შესაძლებელი გახდა მიეღწიათ 300 ათასი ტონა წლიური წარმადო-
ბისათვის 65 ტ ტევადობის ერთ ღუმელზე. ასეთივე წარმადობა

მიიღწეოდა ამავე ტევეადობის ორ ღუმელსე ჩვეულებრივი ტექნოლოგიის გამოყენებისას.

სასოგადოებამ „Voest Alpine“ წამოაყენა კაპიტალდაბანდებუბის მთელი რიგი გამოთვლები მცირე ქარხნების მშენებლობისას. მათ ეკუთვნით აგრეთვე ისეთი ქარხნების კაპიტალდაბანდებების ეფექტურობის გამოთვლები, რომლებიც თავისი სტრუქტურით მცირე ქარხნებს ეკუთვნიან, მაგრამ მათი სიმძლავრე უფრო მეტია, ვიდრე მცირე ქარხნებისა. რიგ შემთხვევებში მათ აქვთ შესაძლებლობა აწარმოონ ღრუბლოვანი რკინა, გამომწვარი კირი და ჟანგბადი. ასეთი ქარხნებს ნაკლები კაპიტალური დაბანდებები სჭირდებათ, ვიდრე სრული ციკლის მეტალურგიულ ქარხნებს. მეტიც, მცირე ქარხნების პროდუქცია გათვალისწინებულია ადგილობრივი ბაზრებისათვის, რის გამოც მათ უფრო ნაკლები სატრანსპორტო ხარჯები აქვთ და იყენებენ ადგილობრივ ნედლეულს (ჯართი, ბუნებრივი აირი, ქვანახშირი და სხვ).

მცირე ქარხნები ხასიათდება მაღალი წარმადობით, ეკონომიკური ეფექტურობით, პროდუქციის ფართო სორტამენტის გამოშვებით. ეკონომიკურ ეფექტურობაში იგულისხმება: კაპიტალური დანახარჯების, ენერჯის, მასალებისა და შრომითი დანახარჯების შემცირება.

აშშ, სადაც რკალური ღუმელების გამოყენების წილი ყოველწლიურად იზრდება და შესაბამისად დიდი გაქანება პოვა მცირე ქარხნების მშენებლობამ, ყველაზე კარგ სურათს იძლევა მათი მომავლის თაობაზე. მას შემდეგ, რაც მცირე ქარხნები გადაიყვანეს ბრტყელი ნაგლინის გამოშვებაზე, მათი ადგილი მეტალურგიაში მნიშვნელოვნად გაიზარდა. აშშ-ში 1955 წლიდან დაიწყო ასეთი ქარხნების რაოდენობის მნიშვნელოვანი ზრდა. მათი მშენებლობა ძირითადად ხორციელდება არა ძველი ქარხნების რეკონსტრუქციით, არამედ ახალ ადგილზე 1955 წლის აპრილში ფირმა „NSBXP“ წამოიწყო ასეთი მცირე ქარხნის მშენებლობა, რომლის საერთო ღირებულება შეადგენდა 400 მლნ. დოლარს. იგი აშენდა ახალ ადგილზე. გათვალისწინებული იყო ჭაშვიანი ორკორპუსიანი ღუმელის დადგმა კაშმის წინასწარი გახურებით. ციცხულუმელი და ლითონის ზოლის ცხელი გლინის დგანი. ამ დგანზე შესაძლებელი იყო 90 მმ სლაბების გაგლინვა 1 მმ სისქის ზოლიად. აღნიშნული მცირე ქარხნის აღჭურვილობა საშუალებას იძლევა წლიური წარმადობა 1,5 მლნ ტ-მდე მიიყვანოს 350 ადამიანის დასაქმებით.

ფირმამ „ტრაიკო სტილ“ იმავე წელს დაიწყო 2,2 მლნ ტ წლიური წარმადობის მცირე ქარხნის მშენებლობა. იგი აღჭურვილია მუდმივი დენის ერთი ღუმელით, თხელი სლაბების უწყვე-

ტი ჩამოსხმის მანქანებით, ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების დანადგარით და ზოლის ცხელი გლინეის დგანით. ჩვეულებრივი და მაღალი ხარისხის ცხლად ნაგლინი ფურცლები გამოიყენება მიღებისა და საკონსტრუქციო დანადგარების დასამზადებლად. ქარხნის მშენებლობა დაჯდა 450 მლნ დოლარი. ამავე ქარხანაში შესაძლებელია აგრეთვე 2 მმ-ზე ნაკლები სისქის ფურცლების გამოშვება. ქარხანა აშენდა ~ 18 თვეში.

ფირმამ „შლემან ზიმაგ“ გაუშვა მცირე ქარხანა, სადაც გამოიყენეს უწყვეტი ჩამოსხმის ახალი მანქანა. იგი საშუალებას იძლევა 30 %-ით გაიზარდოს ჩამოსხმის სიჩქარე. ფურცლის მაქსიმალური სიგანეა 1680 მმ და პროცესი მთლიანად კომპიუტერიზებულია მაღალი ხარისხის სხმულის მიღებისათვის. ქარხნის სიმძლავრეა 1,8 მლნ ტ წელიწადში. ქარხნის მშენებლობაზე დაიხარჯა 500 მლნ დოლარი.

ფირმამ „უირლდგლას პროსესინგ ინკორპარეტივდ“ თავის ქარხანაში (~1 მლნ ტ წელიწადში) დააყენა ცვლად დენზე მომუშავე 150 ტ ტევადობის ერთი ღუმელი. ქარხანა ამზადებს 101-127 მმ სისქის სლაბებს.

ფირმამ „გელეტინ სტილ კამპენი“, რომლის ქარხნის ღირებულებაა 360 მლნ დოლარი, ხოლო წლიური წარმადობა - 12 მლნ ტ, გამოიყენა მუდმივ დენზე მომუშავე 200 ტ ტევადობის ორკორპუსიანი ღუმელი, ალტურვილი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების დანადგარებით და ზოლის ცხლად გლინეის დგანით. მომუშავეთა რიცხვია 220 ადამიანი. მომავლისათვის განსაზღვრულია კიდევ ერთი ასეთი ღუმელის გაშვება და წარმადობის გაზრდა 2 მლნ ტონამდე. უკანასკნელ ღონისძიებაზე განსაზღვრული იყო 100 მლნ დოლარის ხარჯი.

„სტილ დაინემიკს“ ფირმის ქარხანაში, რომლის წლიური წარმადობა აღწევს 1,2 მლნ ტ-ს და სულ 280 ადამიანი მუშაობს. სადნობი აგრეგატია ცვლადი დენის ორკორპუსიანი ღუმელი, ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 120 მგვა და ციციხე-ღუმელი. სიმძლავრით 22 მგვა. ქარხანა თავისი უნიკალური დანადგარებით უშვებს ისეთ პროდუქციას, რომ შეძლებს დააკმაყოფილოს იმ მომხმარებელთა მოთხოვნები, რომლებიც მარტო ცივი გლინეის პროდუქციით სარგებლობენ.

კანადური ფირმა „ინტერპროვინშლ სტილ ენდ პაინ“ უშვებს თავის მცირე ქარხანას მუდმივი დენის ორკორპუსიანი ერთი ღუმელით. მისი მთლიანი წარმადობაა 1,5 მლნ ტ წელიწადში; ტრანსფორმატორით 140 მგვა, დანადგარების ღირებულებაა 360 მლნ დოლარი.

მცირე ქარხნების განვითარების ასეთი მიმართულება (ბრტყე-
ლი ნაგლინის ათვისებით), სპეციალისტების აზრით, კიდევ გა-
გრძელდება.

თ ა ვ ი IV

ელექტროფოლადსადნობი საამქროები

ზემპლავრი ღუმელების შექმნამ და პრაქტიკაში გამოყენებამ
საგრძობლად შეცვალა მოქმედი ელექტროფოლადსადნობი
საამქროების დაგეგმარება. პირველი ზემპლავრი ღუმელები
დაყენებულ იქნა ძველ საამქროებში (ელექტროფოლადსადნობ
ან მარტენის) ისე, რომ საამქროს გეგმა მთლიანად იყო შენარ-
ჩუნებული. შემდგომმა დაკვირვებებმა ცხადყო, რომ ახალი ზე-
მპლავრი ღუმელების ეფექტიანი მუშაობისათვის საჭირო იყო
სადნობი საამქროს ისეთი გადაკეთება, რომელიც უზრუნველყოფდა
ღუმელის შეუფერხებელ მუშაობას.

ძველი ფოლადსადნობი საამქროები ყველა ერთნაირი სქემით
შენდებოდა: საკაზმე ეზო, სადნობი მალი, საჩამოსხმო მალი.
ზოგიერთ ფოლადსადნობ საამქროში, სადაც ნაწილი გამოდნო-
ბილი შენადნობებისა და ფოლადის ჩამოსხმისათვის საჭირო
იყო მცირე ზომის (0,5 ტ-მდე) ბოყეები და შემდგომში სხმულების
მოწვა ან თერმული დამუშავება, მიშენებული ჰქონდა კიდევ
ერთი მალი ზემოთ მოყვანილი პროცესებისათვის. მალევე განლა-
გებული იყო ერთმანეთის პარალელურად. საკაზმე მასალები
საკაზმე ეზოში რკინიგზით შექქონდათ. აქვე იყო განლაგებული
საკაზმე ხვიმირები (რაც უფრო დიდი იყო გამოსადნობი ფო-
ლადების ასორტიმენტი, მით მეტი ხვიმირი იყო საჭირო). კაზმის
გარდა საკაზმე ეზოში შემოიქონდათ ამწიდველები (გამომწვარი
კირი, მღლობის შპატი, დოლომიტი და სხვ.). ფეროშენადნობები,
ელექტროდები, ამზადებდნენ ფეროსიცილიუმისა და გრაფიტის
ფხენილს. საკაზმე ეზოში იდგა სასწორები (დაახლოებით 1
სასწორი ორ ღუმელზე), რომლებზეც იდგმებოდა ჩასატვირთი
კალათები თავისი ქვეშით. კალათში იტვირთებოდა ჯართი, ამწიდ-
ველები, ფეროშენადნობები და ისე მიეწოდებოდა ლიანდაგით
სადნობი მალისაკენ. სადნობი მალის ის ადგილები, სადაც ჩასა-
ტვირთი კალათი მიეწოდებოდა ურიკით, ამოჭრილი იყო, რომ
ამწეს საშუალება ჰქონოდა ამოეწია ჩასატვირთი კალათი თავისი

ქვეშით, ამწოდველი მასალები სადნობ მაღზე მიეწოდებოდა როფებით ამწეების საშუალებით. საკაზმე და სადნობი მალეები ისე იყვნენ ერთმანეთთან დაკავშირებული, რომ საკაზმე მალზე მოძრავი ამწეებით საშუალება ჰქონოდათ ტვირთი დაელაგებინათ სადნობი მალის აივნებზე, რომლებიც გადასული იყვნენ საკაზმე მალზე. როგორც წესი, სადნობი მალი უფრო მაღლა იდგა, ვიდრე საკაზმე და საჩამოსხმო. ორი უკანასკნელი ერთ სიმაღლეზე იყო განლაგებული. სადნობ ბაქანზე მიწოდებულ მასალებს (უმთავრესად როფებით) ხორთუმიანი ამწით გადაადგილებდნენ იქ, სადაც მოითხოვდა ტექნოლოგიური ციკლი. ფეროშენადნობებს – გამო-საწვაე ღუმელებში, მაგნეზიტის ფხენილს და გამოიწვეარ კირს სპეციალური ხეიმირებით – ღუმელის წინა სამეწაო ბაქანზე. ელექტროდებს – ელექტროდების გადასაბმელ ხერელებთან და ა.შ. სადნობ მალზე ორ ღუმელს ემსახურებოდა ერთი ჩასატვირთი ამწე და 3-4 ღუმელს – ერთი დამხმარე ამწე. თუ საამქროში განლაგებული იყო სხვადასხვა ტევადობის ღუმელები, მაშინ ამწეების სიმძლავრეებიც სხვადასხვა იყო. გამოიძნარი ლითონი ჩამოსხმებოდა ამწეზე ჩამოკიდებულ ციცხეში, რათა შესაძლებელი ყოფილიყო მისი გადაადგილება თხევადი ლითონის ჭავლის სიგრძის დასამოკლებლად და იმისათვის, რომ ჭავლს არ გამოეჭამა ციცხვის კედელი. ციცხვი თხევადი ლითონით მიეწოდებოდა საჩამოსხმო ბაქანზე; ერთი საჩამოსხმო ბაქანი ორ ღუმელს მაინც უწევდა მომსახურებას. თუ საამქრო აღნობდა ისეთ შენადნობებს და ფოლადებს, რომელთა წონა არ აღემატებოდა ~0.5 ტ-ს და უნდა გაცივებულიყო ნელა, მაშინ საამქროს საჩამოსხმო ბაქნების გარდა დამატებით ჰქონდათ საჩამოსხმო ორმოებიც. ღუმელების რაოდენობა ერთ საამქროში იცვლებოდა 3-დან 6-მდე (ზოგჯერ მეტიც). რაც დამოკიდებული იყო ღუმელების ტევადობასა და გამოსადნობი ლითონის ნომენკლატურაზე.

თანამედროვე ზემძლავრი ღუმელების გამოიწინის შექმნეუ თანდათან იცვლებოდა საამქროების დაგეგმარება. იცვლებოდა შიდა ტვირთსაზიდი დანადგარების მოძრავობის სქემა და გამოყენებული მოწყობილობის ექსპლუატაციის ხასიათი. ძირითადად შეიცვალა საკაზმე მასალების ტრანსპორტირებისა და მიწოდების სქემა. ღუმელების რაოდენობა საამქროში ერთი ან ორია. ღუმელების ინდივიდუალური მომსახურება ამწეებით ხდება. საკაზმე მალში უკვე აწონილი, მომზადებული და დანატროვნებული კაზმი მიეწოდება უმთავრესად დახარისხებული ინდივიდუალური სატრანსპორტო საშუალებით. თვით ღუმელი ეკოლოგიური თვალსაზრისით მთლიანად მოქცეულია ხუფის ქვეშ ხმაურის დასახ-

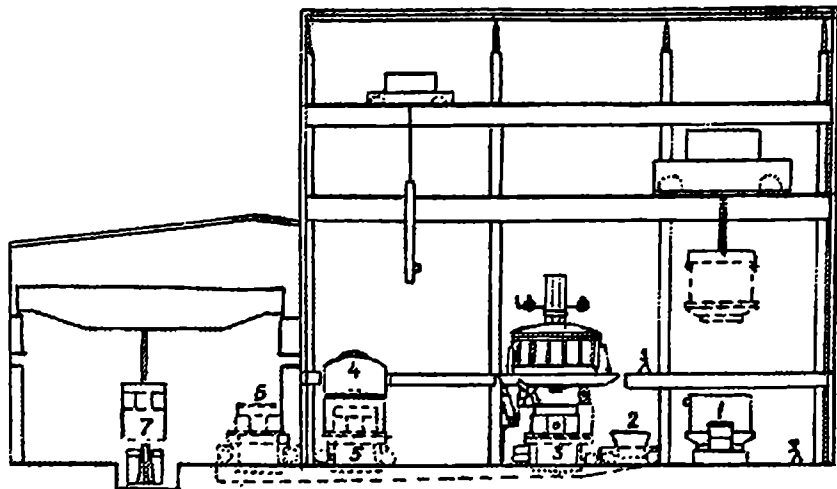
შობად. წარმოიქმნილი აირები გაიწოვება თაღში გაკეთებული მეოთხე ნახერტიდან. თაღში კეთდება მესხეთე ნახერტიც ამწიდველებისა და სხვა დანამატების მისაწოდებლად. ამისათვის ღუმელის თავზე მოთავსებულია ხვიმირჭი, რომლებშიც კონვეიერით იყრება წინასწარ დამზადებული მასალები. კონვეიეროდან გადმოსული მასალები იწონება და ისე იყრება ღუმელში. გამოშვებული თხევადი ლითონი ჩაედინება ციციხეში, რომელიც დგას ასევე ინდივიდუალურ გამწვევ მოწყობილობაზე. თხევადი ლითონის ჭავლი არის მოკლე და კომპაქტური, ამიტომ გამოირიცხება ციციხის კედლის დაზიანება და შექმნილია ლითონის ჭავლის ნაკლები დაჟანგვის პირობა. თხევადი ლითონი ახლად დაგეგმარებულ საამქროებში უმთავრესად ჩამოსხმება უწყვეტი ჩამოსხმის დანადგარებზე. ამის გამო შეიცვალა საჩამოსხმო მალის ძველი დანიშნულება და მოვალეობა. ძირითადად ამ მალში ხდება თხევადი ლითონის დამუშავება სხვადასხვა ღუმელსგარეშე დამუშავების დანადგარებში.

ყოველივე ზემოთქმულის საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ახალი საამქროს დაგეგმარებისას, ზემძლავრი რკალური ღუმელებით უსათუოდ საჭიროა გათვალისწინებული იქნეს ყველა ის თანამედროვე მიღწევა, რომელიც უკვე დანერგულია პრაქტიკაში. მით უმეტეს, რომ საამქროების მშენებლობას სჭირდება გარკვეული დრო, და ამ დროის განმავლობაში კი (იუ გავითვალისწინებთ გამოვონებისა და მისი დანერგვის ამჟამინდელ სისწრაფეს) შესაძლებელია კიდევ მოხდეს ახალი ტექნიკისა და ტექნოლოგიის შექმნა, რის შედეგადაც დაგეგმარებული და აშენებული საამქრო უკვე მოძველებული აღმოჩნდება. ამის თავიდან ასაცილებლად ყველა ახალი საამქროს დაგეგმარებისას საჭიროა გათვალისწინებულ იქნეს მისი მოდერნიზაციის საშუალებები.

როგორც უკვე ითქვა, თავდაპირველად ზემძლავრი ღუმელები იდგმებოდა ძველი საამქროს შენობებში, ამ ნაგებობების გამოყენების მიზნით. ფირმა A.F. Faldk-მა (იტალია) 1976 წელს მარტენის საამქროში არსებულების მაგივრად დააყენა 140 ტ ტვეადობის რკალური ღუმელი, ტრანსფორმატორით 75/90 მგვ-ა, უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანით და ლითონის ვაკუუმით დამუშავების დანადგარით (VAD). პროექტით გათვალისწინებული წლიური წარმადობა იყო 250 ათასი ტ. გამოდნობილი ლითონის 80 % ჩამოსხმებოდა უწყვეტი ჩამოსხმის დანადგარზე. მეორე რიგში განსახდერული იყო საამქროს წლიური წარმადობის გაზრდა 400 ათას ტ-მდე მეორე ღუმელის დაყენებით. ასეთივე მიზნების მიღწევა შეძლეს კრუპის (გფრ) ფირმის მიერ შეთავაზებული დანადგარებისა და ტექნოლოგიის მოდერნიზაციით. ჩატარებულ ღონისძიებებში

შედიოდა: ღუმელში ჩატვირთვის რაოდენობის შემცირება 3-დან 2-მდე; კაზმის საერთო რაოდენობის შემცირება 140-დან 120 ტ-მდე; ელექტრული რეჟიმის რაციონალიზაცია გადნობის პროცესის მართვის კომპიუტერიზაციის გამოყენებით; კედლებისა და კამარის კერამიკული ამონაგის შეცვლა წყლით საცივებელი პანელებით; გადნობის დაჩქარება აირჟანგბადის სამი სანთურის ჩაყენებით კედლებში (400 მ³/სთ ბუნებრივი აირი, 800 მ³/სთ ჟანგბადი); გამო-საშვები არხის შეცვლა ღუმელში თხევადი ლითონის ჩატოვებით; მასალების ღუმელში და ღუმელიდან მიწოდების ჩაკალების რაციონალიზაცია; ყველა მალეგირებელის და წილის წარმოქმნილის ღუმელში ჩატვირთვა თაღში ამოჭრილი მეხუთე ნახერტიდან; ციცხეში ყველა მასალის მიწოდება შეიძლება თხევადი ლითონის გამოშვებამდე, გამოშვებისას და გამოშვების შემდეგ. თუ როგორ შედეგებს იძლევა საამქროს მუშაობის მოდერნიზაცია მისი გადაკეთების შემდეგ, შეიძლება დავასკვნათ შემდეგი მონაცემებით: წლიური წარმადობა გაიზარდა 224774-დან 313373 ათას ტ-მდე; თხევადი ლითონის წონა ციცხეში შემცირდა 126,5-დან 111,0 ტ-მდე; დნობის საშუალო რიცხვი გაიზარდა 7,5-დან 12,5-მდე დღე-ღამეში; საშუალო დღეღამური წარმადობა გაიზარდა 910-დან 1500 ტ-მდე; ჩატვირთვები (68+48+20)-დან (68,5+51,5) ტ-მდე საშუალო სიმძლავრე დნობაზე 40,4-დან 47,7 მგვ ტ-მდე შემცირდა, საშუალო გაცდენები 38-დან 30 წო-მდე; გადნობა (დენით) 82-დან 58 წო-მდე, დახალასება 32-დან 26 წო-მდე; დნობის საერთო ხანგრძლივობა 179-დან 138 წო-მდე; წარმადობა 53,8-დან 62,3 ტ/სთ-მდე; ჟანგბადის ხარჯი 4,8-დან 11,1 (მათ შორის სანთურებზე 7,6) მ³/ტ-ზე; ელექტროდების ხარჯი 6,5-დან 3,9 კგ/ტ-მდე; გამოდნობილი ფოლადის ასორტიმენტში შედიოდა: ფერიტული კოროზიამდეგი - 10 %; საიარაღო - 12,5 % არალეგირებული - 10 %; სამილე - 62,5 %; ღრმად გამოსაჭიმი და დაბალლეგირებულები - 2,5 %.

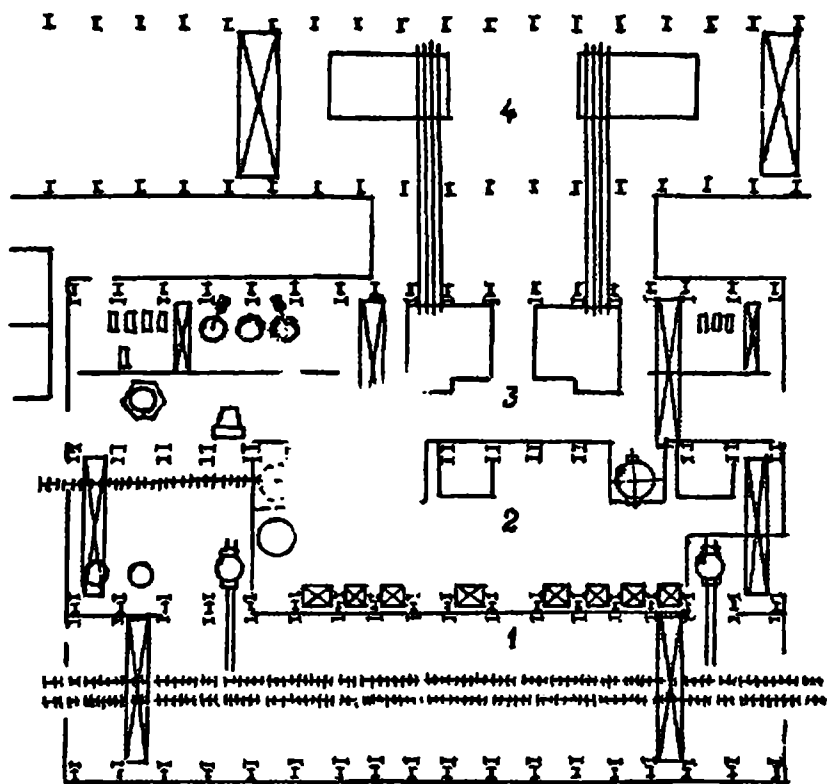
ფირმა ტისენის ერთ-ერთ ქარხანაში [103] მარტენის საამქროს გაჩერების გამო დაყენებულ იქნა 110 ტ ტვეადობის ზემოდავრი რკალური ღუმელი. ღუმელი დაყენებულ იქნა ახალ მალში ფართობით 22X40 მ². სამუშაო ბაქანი იმყოფებოდა 7,5 მ-ის სიმაღლეზე საამქროს იატაკიდან, ხოლო ჩასატვირთი და მომსახურე ამწეების სავალი ლიანდაგი შესაბამისად 22 მ და 29 მ-ზე (სურ. 10.18). საღუმელე მალში მოთავსებულია ლითონის ციცხეში ვაკუუმი-რების დანადგარი. ერთ-ერთ გვერდით მალში, ღუმელისა და ენერგომარაგების სისტემის მოწყობილობასთან ერთად, დამონტაჟებულია სახვიმირე ესტაკადა. მასალების ჩატვირთვა და გადმოტვირთვა ხვიმირებიდან (14 ცალი) ხდება ეგმ-ით. ღუმელის გარსაც-



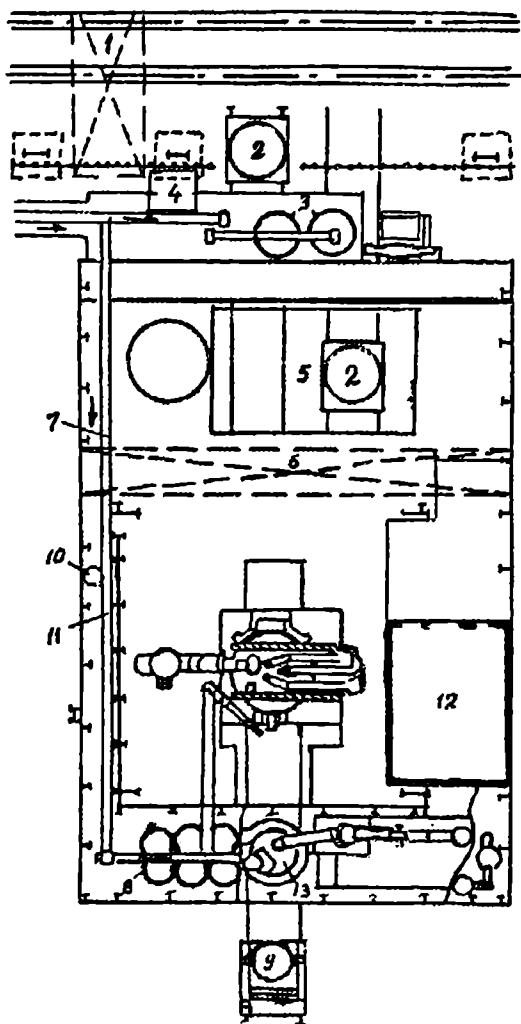
სურ. 10.18. 110 ტ ტევადობის რკალური ღუმელი და საღუმელე მაღის განივი ჯრილი: 1. ჩასატვირთი კალათა ჯართით სატრანსპორტო ურიკაზე; 2. საწიდე ურიკა; 3. ციცხვი სატრანსპორტო ურიკაზე ლითონის გამოშვებისას; 4. ვაკუუმ-დანადგარი არასამუშაო მდგომარეობაში; 5. ციცხვის მდგომარეობა ლითონის ვაკუუმით დამუშავებისას; 6. ციცხვის გადაადგილება საჩამოსხმო ორმოსკენ; 7. ციცხვის მდგომარეობა ჩამოსხმისას.

მის დიამეტრია 6,8 მ, ტრანსფორმატორის სიმძლავრეა 75 მგვ.ა. მეორადი ძაბვა – 221–750 ვ, ღენის მაქსიმალური ძალა 80 კა. ლითონის გამოშვება ხდება ქვედში გაჭრილი ხერელიდან. ღუმელის კარიბჭე (პორტალი) ელექტროდებით ეყრდნობა საძირკვიდან კოჭს და კაზმის ჩატვირთვისას იგი გადაადგილდება. ღუმელის კორპუსი მოთავსებულია ჩარჩოში. სამუშაო ფანჯრისაკენ ღუმელის გადმოხრის კუთხეა 10° . ღუმელის გარსაცმს გარედან გაკეთებული აქვს გამოსაწევი საყრდენი, რის გამოც ადვილია კედლის წყლით საცივებელი ელემენტების გამოცვლა დაზიანების შემთხვევაში. რადგან ლითონის გამოშვებისას ღუმელს არ სჭირდება გადაყირავება, ამიტომ სამუშაო ბაქანი შეკრულია, რაც საშუალებას იძლევა მიუდგნენ ღუმელს ყველა მხრიდან. ციცხვი ღუმელს მიეწოდება ფართოლიანდაგებიანი გზით და ამავე გზით გადაადგილდება ვაკუუმირების დანადგარისკენ. ვაკუუმით დამუშავების შემდეგ თხევადლითონიანი ციცხვი ამწეს მიეწოდება ურიკით, რომელიც წინათ მარტენის საამქროს ემსახურებოდა.

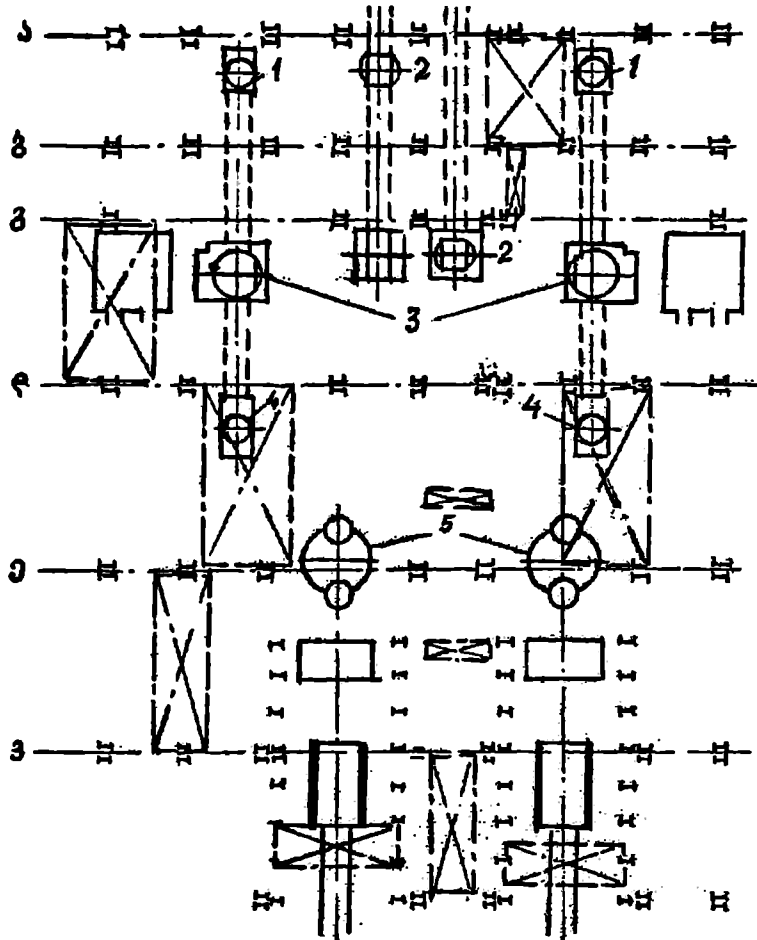
საამქროების სქემატური გეგმები იხ. სურათებზე 10.19, 10.20 და 10.21.



სურ. 10.19. ფირმა „ჩაპარელ სტილის“ (აშშ) ქარხნის საამქრო (სქემა):
 1. საკაზმე ეზო; 2. საღუმელე მალი; 3. საჩამოსხმო მალი



სურ. 10.20. ფირმა „კრუპ შტალვერკე ზიუდესტფალის“ (გფრ) ქარხნის ელექტროფოლადნობი საამქრო (სქემა): 1. 20 ტ ამწვობის ამწები; 2. სასწორიან ურიკებზე მოთავსებული ჩასატვირთი კალათები; 3. ჩასატვირთ კალათაში ანთრაციტის და კირქვის ჩასაყრელი ხეიმირები; 4. საკაზმე მასალების დოზირების პულტი; 5. სამუშაო ბაქანისაკენ ჩასატვირთი კალათების გადასაადგილებელი ლიანდაგი; 6. ამწე; 7. კორიზონტალური ტრანსპორტიორი; 8. ზედა სახარჯი ხეიმირები; 9. ციცხვი; 10. ხეიმირა; 11. ხმის დამაკავებელი კედლები; 12. სამართავი პულტი.



სურ. 1021. ყოფილ სსრკ-ში დაგეგმარებული ელექტროფოლადსადნობი საამქრო (სქემა): 1. საწიდე თვითმავალი ლიანდაგური ურიკა; 2. სამუშაო ბაქნებს შორის მოძრავი ურიკა; 3. რკალური ლუმენები; 4. ციცხეები; 5. უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა.

ზემძლავრი ღუმელების მუშაობის თანამედროვე ტექნოლოგია

ზემძლავრი რკალური ღუმელები ამჟამად გამოიყენება მხოლოდ სადნობ აგრეგატებად. თხევადი ლითონის დახალასებისა და დაყვანის თითქმის ყველა ტექნოლოგიური ოპერაცია გადატანილია ციცხეში. ასეთი გარემოება შეიქმნა იმ მიზეზით, რომ უფრო სრულყოფილად გამოიყენებინათ მძლავრი ტრანსფორმატორები, შეემცირებინათ დნობის ხანგრძლივობა და I ტლითონზე დახარჯული საერთო ენერგია. ამის გამო ზემძლავრ რკალურ ღუმელებში დნობის ტექნოლოგია საგრძნობლად განსხვავდება დნობის „კლასიკური“ ტექნოლოგიისაგან.

10.5.1. დნობის ტექნოლოგია ზემძლავრ რკალურ ღუმელებში

ზემძლავრი რკალური ღუმელების ძირითად ტექნოლოგიურ ოპერაციებად ითვლება კაზმის გადნობა, ნახშირბადის ამოწვა, ლითონის გადახურება, განჟანგვა და ლევირება. ჩამოთვლილი ოპერაციების მიმდევრობა ერთი შეხედვით თითქოსდა არ განსხვავდება დნობის „კლასიკური“ ტექნოლოგიური პროცესებისაგან, სინამდვილეში კი მათ შორის დიდი განსხვავებაა. კაზმის გადნობა ორივე ტიპის ღუმელებში ერთნაირად უნდა მიდიოდეს. მაგრამ ზემძლავრი რკალური ღუმელების ნომინალური სიმძლავრე საგრძნობლად აღემატება ჩვეულებრივი ღუმელების ნომინალურ სიმძლავრეს (500–1000 მგვ./ტ ნაცვალად 200–300 მგვ./ტ). ამიტომ გადნობის ხანგრძლივობა გაცილებით ნაკლებია. ამასთან, გადნობის პერიოდში გამოიყენება მძლავრი ჟანგბად-სათბობის სანთურები. დნობის „კლასიკური“ პროცესებისას გადნობის პერიოდის შემდეგ იწყება დაჟანგვითი პერიოდი, რომელსაც მოსდევს დახალასების პერიოდი. სამივე პერიოდი მკვეთრად გამოყოფილია ერთიმეორესაგან. ზემძლავრი რკალური ღუმელების მუშაობისას გადნობის ბოლო ნაწილი ემთხვევა განფოსფორებას და დუღილის პერიოდის დაწყებას, ამიტომ დაჟანგვითი პერიოდი უფრო ხანმოკლეა; ხოლო დახალასების პერიოდი ან მთლიანად გადატანილია ციცხეში, ანდა ძალიან მცირე დროში მთავრდება. ზე-

მძლავრ რკალურ ღუმელებში კაზმის გადნობის დანიშნულებაა, რაც შეიძლება მეტი რაოდენობით მოშორდეს ლითონს არასასურველი ელემენტები, ძირითადად ფოსფორი და გოგირდი, დაიჟანგოს ზედმეტი ნახშირბადი და თანაც ლითონი გახურდეს საჭირო ტემპერატურამდე, მოიხადოს დაჟანგული წიდის უდიდესი ნაწილი განჟანგვისა და ლეგირების დაწყებამდე. თუ ლითონი ლეგირებულია ისეთი ელემენტებით, როგორცაა ნიკელი და მოლიბდენი, მაშინ შეიძლება მათი ჟანგეულების ჩატვირთვა კაზმთან ერთად, რადგან აღნიშნული ელემენტები რკინასთან ერთად არ იჟანგება*.

ერთადერთი ტექნოლოგიური პროცესი, რომელიც შეიძლება ჩატარდეს გადნობის პერიოდში, ეს არის განფოსფორება. განფოსფორებისათვის საჭიროა რკინის ქვეჟანგის დიდი რაოდენობა წიდაში და მისი მაღალი ფუძიანობა. ფუძიანობის მომატებისათვის კაზმთან ერთად ღუმელში ტვირთავენ კირს ან კირქვას. რკინის ჟანგეულები (ქვეჟანგი) კი შეიძლება წარმოიქმნან როგორც აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას გადნობის პროცესში, ასევე რკინის მადნის ან ხენჯის დამატებით გადნობის პერიოდის წიდაზე. დნობის „კლასიკური“ პროცესებისას მიღებულია, რომ განგოგირდება გადნობისა და დუღილის პერიოდში არ ხდება (ანდა ხდება ძალიან მცირე რაოდენობით). საწინააღმდეგო სურათია ზემძლავრი რკალური ღუმელების მუშაობისას [104]. კაზმთან ერთად ღუმელში კირის დიდი რაოდენობით ჩატვირთვით, თხევადი ლითონის პირველი ნიმუშის აღებამდე, ლითონიდან წიდაში გადადის არა მარტო ფოსფორი, არამედ გოგირდის დიდი რაოდენობაც. სურათზე 10.16. მოყვანილია წიდასა და თხევად ლითონს შორის გოგირდის განაწილების დამოკიდებულება ფუძიანობისგან. აღსანიშნავია, რომ მაღალი ფუძიანობისას (4-5) გოგირდის განაწილების კოეფიციენტი საკმაოდ დიდი მნიშვნელობისაა (~10).

განფოსფორებას და განგოგირდებას ხელს უწყობს წიდის თვითდინებით გადმოსვლა ღუმელის სამუშაო ფანჯრიდან. ღუმელში კირის, ჟანგბადის (რკინის ქვეჟანგის წარმოქმნისათვის) და ნახშირბადის შემცველი მასალის მიწოდებით წარმოიქმნება ქაფისებრი წიდა, რომელიც მატულობს სიმაღლეში (ამიტომ მისი დონე ღუმელის ზღურბლის დონეზე მაღლა იწევს) და იწყებს გადმოსვლას სამუშაო ფანჯრიდან. ღუმელიდან თავისთავადი დინების გამო წიდის რაოდენობა მცირდება. ამ გარემოებამ შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს ღუმელის მუშაობაზე: რკალი გაშიშვლდეს წიდისაგან, ხოლო ღუმელის კედლებსა და თაღზე

* რედაქტორისაგან: მეტიც, Mo და Ni აღდგება ჟანგეულებიდან.

იმატოს თბურმა დატვირთვებმა. ამის თავიდან ასაცილებლად ღუმელში, წიდის გადმოსვლასთან ერთად, ეძლევა ამწიდველები: კირი, მლღობი შპატი, ბოქსიტი და სხვ.

განფოსფორებისათვის წიდის ფუჰიანობა გადნობის დასასრულს უნდა იყოს არანაკლებ 2-2,5-სა, ხოლო რკინის ქვეჟანგის შემცველობა წიდაში - 15-20 %. წიდაში რკინის ქვეჟანგის ასეთი რაოდენობის მისაღწევად კაზმის ბოლო ნაწილთან ერთად ღუმელში ეძლევა რკინის მადანი ან აგლომერატი ~10-20 კგ/ტ-ზე. როცა ფოსფორის შემცველობა თხევად ფოლადში დაეა 0,015 %-მდე, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ იგი უზრუნველყოფს მზა ფოლადში ფოსფორის შემცველობას 0,025-0,035 %-ს. ამისათვის საჭიროა შეიზღუდოს ფოსფორის აღდგენა წიდიდან. რასაც აღწევენ წიდის განახლებით (წიდის თვითღინებით გადმოსვლა და ახალი ამწიდველების ღუმელში მიცემა).

გადნობა დამთავრებულად მაშინ ითვლება, როცა ღუმელში თვალთ ალარ შეიმჩნევა მყარი კაზმი. ლითონის ტემპერატურა ამ დროისათვის აღწევს 1520-1550 °C. საჭიროა ვიცოდეთ, რომ გადნობის ადრე დამთავრებას (როცა ღუმელის ფერდებზე კიდევ ჩანს მყარი კაზმი) შეიძლება მოჰყვეს არასასურველი მოვლენები, განსაკუთრებით მაშინ, როცა გადნობისას არ გამოიყენება ჟანგბადი და რკინის მადანი. ამ დროს უარესდება ღუმელის მუშაობის ეკონომიკური მაჩვენებლები (იზრდება ელექტროენერჯის, ელექტროდების, ცეცხლგამძლე მასალის ხარჯი) და გადნობის ბოლოსათვის, როცა მოიმატებს თხევადი ლითონის ტემპერატურა, იქმნება ლითონში გახსნილი ნახშირბადის სწრაფი დაჟანგვის შესაძლებლობა, რასაც თან შეიძლება მოჰყვეს ლითონის გადმოსვლა ღუმელის სამუშაო ფანჯრიდან.

გადნობისთანავე საჭიროა პირველი ნიმუშის აღება ქიმიურ ანალიზზე. უნდა განისაზღვროს ნახშირბადი, მანგანუმი, გოგირდი, ფოსფორი, ნარჩენი ელემენტები. თუ ფოლადი ლეგირებულია ნიკელით და მოლიბდენით, რომლებიც ჩატვირთულია კაზმში. განისაზღვროს ისინიც. ნახშირბადის განსაზღვრას მეტად დიდი მნიშვნელობა აქვს ამ მომენტისათვის, რადგან თხევადი ლითონის განთავისუფლებისათვის მასში გადნობის დროს გახსნილი აირებისაგან (წყალბადი, აზოტი), ლითონის ტემპერატურის გათანაბრებისა და არალითონური ჩანართების გამოდევნისთვის ფოლადიდან, საჭიროა ჩატარდეს დუღილი ანუ დაიჟანგოს მასში გახსნილი ნახშირბადი. ამიტომ ხშირად ნახშირბადის განსაზღვრისათვის ნიმუშის აღება გადნობის დამთავრებამდეც ხდება, რომ იწინასწარმეტყველონ, რამდენი იქნება უკვე გამდნარ ფოლადში.

თუ ნახშირბადი ლითონში ცოტა აღმოჩნდება, მაშინ საჭიროა მისი დანახშირბადიანება. ამრიგად, გაღწობისათვის ლითონში ნახშირბადის შემცველობა უნდა იყოს უფრო მეტი, ვიდრე ეს გამოსადნობი ფოლადის ქიმიური ანალიზის ქვედა ზღვრით არის გათვალისწინებული. ნახშირბადის ზედმეტი რაოდენობა დამოკიდებულია გამოსადნობი ფოლადის ქიმიურ შედგენილობაზე. ნახშირბადის ამოწვისა და ლითონის გახურების სინქარეები ერთმანეთზეა დამოკიდებული. დაუანგეითი პერიოდის ბოლოსათვის ლითონი იმდენად უნდა იყოს გახურებული, რომ უზრუნველყოთ ფოლადის დამუშავება და ლევირება ციცხეში.

საერთოდ მიღებულია, რომ ნახშირბადის 0,1–0,2 %-ის აიროვანი ჟანგბადით ამოწვისას და ლითონის დამატებით გახურებისათვის საკმარისია 10–15 წუთი. ეს დრო საკმარისია ლითონის კარგად არევისა და ნაწილობრივი დეგაზაციისათვის. ნახშირბადის ამოწვის სინქარე დამოკიდებულია ლითონში შეყვანილი აიროვანი ჟანგბადის რაოდენობაზე. ლითონში ნახშირბადის 0,15–0,2 %-ზე მეტი შემცველობისას ლითონის აბაზანა ითვისებს შეყვანილი ჟანგბადის 40–60 %-ს. ეს სიდიდე დადგენილია პრაქტიკულად ამომწვარი ნახშირბადისა და შეყვანილი ჟანგბადის შედარებით. იგი შეიძლება საგრძობლად შეიცვალოს და დამოკიდებულია ჟანგბადის შეყვანის ხერხზე (სამუშაო ფანჯრიდან, თალიდან, კედლებიდან, საქშენის დახრის კუთხეზე, ნახშირბადის შემცველობაზე ლითონში, წილის რაოდენობაზე, წიდაში რკინის ქვეჟანგის შემცველობაზე და სხვ.). წიდაში რკინის ქვეჟანგის რაოდენობა დამოკიდებულია მის გადანაწილებაზე ლითონსა და წიდას შორის, ლითონში ნახშირბადის (ჟანგბადის) რაოდენობისაგან დამოკიდებულებით. აიროვანი ჟანგბადი ითვლება ლითონში გახსნილი ნახშირბადის გაცილებით უკეთეს დამუხანგველად, ვიდრე რკინის მადანი. აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას ხდება წილისა და ლითონის ტემპერატურის მომატება, მაშინ როცა რკინის მადნის გამოყენებისას ლითონიც და წიდაც ცივდება. რკინის მადნის გამოყენებისას 1 ტ ლითონიდან 1 კგ (ანუ 0,1 % მასით) ნახშირბადის დასაჟანგავად იხარჯება Fe_2O_3 -ის დასაშლელად 22,8 მგჯ თბური ენერგია, ხოლო წარმოქმნილი რკინის გასახურებლად $1550^{\circ}C$ -მდე – 4,1 მგჯ. თბური ენერგიის ეს ხარჯი საგრძობლად აღემატება ლითონში გახსნილი ნახშირბადის დაუანგეით გამოყოფილ თბურ ენერგიას – 11,7 მგჯ, რომლიდანაც 2,2 მგჯ სჭირდება ჟანგბადის გახურებას და ამიტომ მხედველობაში არ მიიღება. თეორიულად 0,1 % ნახშირბადის დაჟანგვისას რკინის მადნით წილისა და ლითონის ტემპერატურა მცირდება $18^{\circ}C$ -ით. აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას პირიქით – იზრდება $10^{\circ}C$ -ით.

აიროვანი ჟანგბადის გამოყენებისას შესაძლებელია ლითონის გადახურება მაღალ ტემპერატურამდე. დაჟანგვის დაწყებისას ამას ხელს უწყობს ლითონში გახსნილი კაჟბადის, ქრომის, მანგანუმისა და სხვათა დაჟანგვა. შემდგომში, როცა ნახშირბადის შემცველობა ლითონში დავა 0,1–0,12 %-მდე, დაჟანგვას იწყებს რკინა. ამიტომ თხევად ლითონში ნახშირბადის მცირე შემცველობისას 0,1 % ნახშირბადის დაჟანგვით ფოლადის ტემპერატურამ შეიძლება 20–25 °C-ით აიწიოს. ამიტომ როცა ლითონში ნახშირბადის შემცველობა მცირდება 0,2 %-დან 0,08 %-მდე, ხოლო წიდაში რკინის ჟანგეულების რაოდენობა მატულობს 12-დან 20 %-მდე, 5 % (ლითონის მასიდან) წიდის არსებობისათვის იჟანგება და წიდაში გადადის 4 კგ რკინა 1 ტ ფოლადიდან. მადნის გამოყენების შემთხვევაში კი იმავე პირობებში ლითონში გადადის ~3 კგ რკინა. განსხვავება შეადგენს ~7 კგ-ს 1 ტ ფოლადზე. მიუხედავად ამისა, აიროვანი ჟანგბადი იმდენად აჩქარებს დნობის პროცესს, რომ მისი გამოყენებისას კი მიღებული ზარალი 7 კგ რკინის სახით მხედველობაში არ მიიღება.

სწორი არ იქნებოდა გვეფიქრა, თითქოს დამჟანგველად უნდა გამოვიყენოთ ან აიროვანი ჟანგბადი, ან რკინის მადანი, რომ ისინი ერთმანეთს გამორიცხავენ. რკინის მადანს ძალიან ხშირად, გადნობის პერიოდის ბოლოსთვის ან დაჟანგვის პერიოდის დასაწყისისათვის (ზოგჯერ კაზმთან ერთადაც), ამატებენ ღუმელში, რათა მათ წიდა ააქაფონ. აქაფებული წიდა კი იცავს ღუმელის კედლებსა და თაღს რკალის ზემოქმედებისაგან.

დნობის „კლასიკური“ ტექნოლოგიით გათვალისწინებულია დაჟანგვითი წიდის მოხდა და ახალი აღმდგენელი წიდის შექმნა. ეს პროცესი საკმაოდ დროს მოითხოვს (10–15 წუთი) და ამიტომ ზემძლავრ რკალურ ღუმელებში დნობა უმთავრესად ერთი წიდის ქვეშ მიმდინარეობს. მით უმეტეს, რომ ზემძლავრ რკალურ ღუმელებზე აირების გამწოვი დანადგარის დაყენებით ღუმელში შეიწოვება ჰაერის დიდი რაოდენობა, რომელიც არ იძლევა საშუალებას შეიქმნას კარგად განჟანგული წიდა ($\text{FeO} < 0,3 \%$). რადგან ზემძლავრ რკალურ ღუმელებზე კარგად განჟანგული წიდის შექმნა მოითხოვს დამატებითი ღონისძიებების ჩატარებას და ამიტომ დნობა ერთი წიდის ქვეშ მიდის, რთულდება განგოგირდების პროცესების ჩატარება. ამიტომ ღუმელში განგოგირდება მხოლოდ ნაწილობრივ ტარდება და აღნიშნული პროცესი გადაიტანება ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების დანადგარებში.

**ზემძლავრი რკალური ღუმელებიდან
გამოშვებული ლითონის ღუმელსგარე
დამუშავება**

ზემძლავრი რკალური ღუმელები, როგორც ეს უკვე იყო აღნიშნული, ასრულებენ სადნობი დანადგარის მოვალეობას თავისი დამახასიათებელი მონაცემების გამო. მაგრამ ასეთ შემთხვევაში ხარისხიანი ფოლადის მიღება შეუძლებელი იქნებოდა. საჭიროა ლითონის განუანგვა, ლევირება, დეგაზაცია, არასასურველი ელემენტების (გოგირდი, ფოსფორი, და სხვ.) მოშორება, არალითონური ჩანართების რაოდენობის შემცირება და ა.შ. ყველა ეს ოპერაცია გადატანილია ციცხეში. ამიტომ ღუმელსგარე დამუშავებას თანამედროვე ელექტროფოლადსადნობ საწარმოებში (და არა მარტო იქ) უდიდესი ყურადღება ენიჭება. ციცხეში ლითონის განუანგვა-ლევირებისას გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ფეროშენადნობთა დამატებას თან ახლავს სითბოს გარკვეული დანაკარგები (ცხრ. 10.12).

ტექნიკური პროგრესისა და მასთან დაკავშირებული ფოლადის ხარისხისადმი გაზრდილი მოთხოვნების დაკმაყოფილება

ცხრილი 10.12

თხევადი ლითონის გაცივება მასში 1 % ფეროშენადნობების გახსნისას

შენადნობი	შენადნობის მარკა	სითბოს დანაკარგები, მგჯ/ტ	ტემპერატურის ვარდნა, °C
ფერომანგანუმი	ΦM 78	16,3	20,6
	ΦM 1,5	14,7	18,7
სილიკომანგანუმი	CMn 17	12,4	15,7
ფეროქრომი	დაბალნახშირბადიანი	14,2	17,9
	საშუალონახშირბადიანი	14,5	18,3
	ΦX 800	16,7	21,1
ნიკელი	H 1-3	12,2	15,5
ფეროსილიკოქრომი	ΦCX 40	3,37	4,3
ფეროსიცილიუმი	ΦC 45	2,0	2,5
	ΦC 65	- 1,54	-2,0
	ΦC 75	- 3,92	-5,0
ფერომოლიბდენი	ΦMo 55	10,0	12,7
ფეროტიტანი	Tn I	10,3	13,0
	Tn B	4,79	6,1
ფეროვანადიუმი	ΦBn	10,7	13,5

იყო ის ბიძგი, რომელმაც სწრაფად განავეითარა ლითონის ღუმელს-გარე დამუშავება.

10.6.1. თხევადი ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების ძირითადი პროცესები და გამოყენების მაგალითები

ლითონური ნაწარმის ხარისხის ძირეული გაუმჯობესებისა და ახლის შესაქმნელად უმეტეს შემთხვევაში საჭიროა რაც შეიძლება მეტად შევამციროთ ფოლადში აირების, არალითონური ნაწარმების, ზოგი მავნე ელემენტისა და ზოგჯერ ნახშირბადის შემცველობები. სადნობი აგრეგატების შეზღუდული შესაძლებლობების გამო ხშირად ყველა ჩამოთვლილი მიზეზის თავიდან აცილება ვერ ხერხდება და ამიტომ გამოყენებულია ლითონის დამუშავებისა და რაფინირების დამატებითი საშუალებები. ყველაზე ხელსაყრელი პირობები შესაძლებელია შეიქმნეს ღუმელის გარეთ: ლითონის დამუშავება თხევადი წიფებით ანდა წიდის წარმოქმნელი მყარი ნარევებით; განმჟანგველებით ან მოდიფიკატორებით; აირების გაქრევით; ვაკუუმით და მრავალი სხვა.

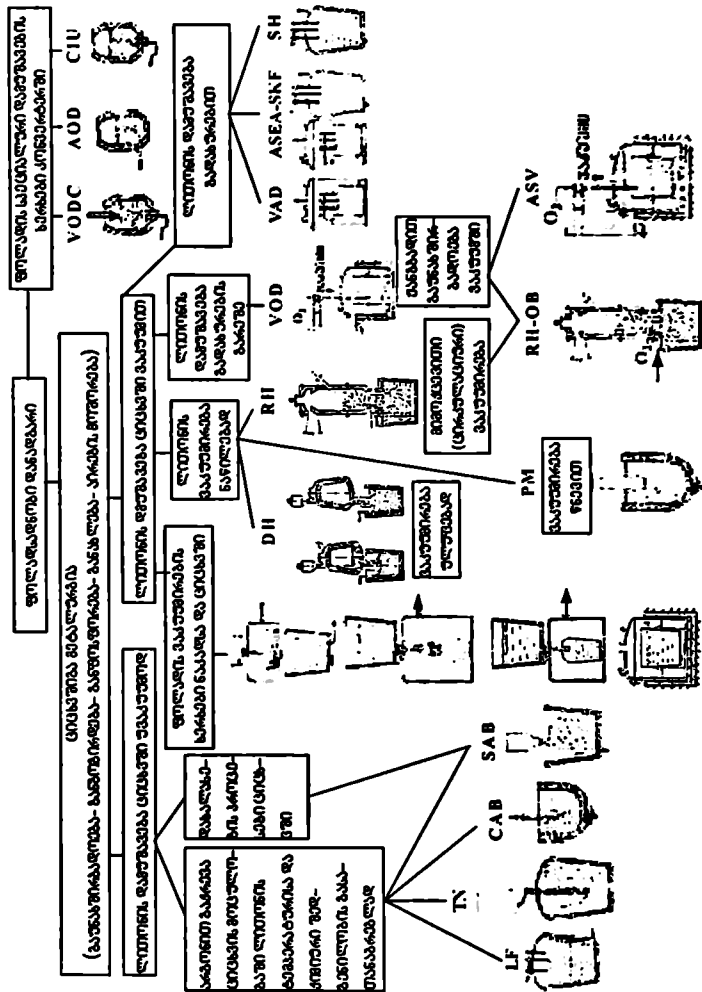
ბუნებრივია, ყოველი ჩამოთვლილი დამუშავებისათვის საჭიროა სპეციალური დანადგარებისა და მოწყობილობების შექმნა. ერთ-ერთ პირველ მნიშვნელოვან ნაბიჯად ამ მიმართულებით ითვლება თხევადი ლითონის ციცხეში გადახურება და არევა ინდუქციური დენებით. ლითონის გადახურებამ ციცხეში გამორიცხა მისი გადახურება ღუმელში და ამით დახალასების პროცესები მთლიანად ღუმელს გარეთ. ციცხეში იქნა გადატანილი. ეს კი თავის მხრივ ზრდიდა სადნობი აგრეგატის წარმადობას და მიზანშეწონილი აღმოჩნდა ზემძლავრი ტრანსფორმატორების გამოყენება ღუმელებზე გადნობის დასაქარებლად. ამავე დროს შესამჩნევი გახდა, რომ თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებით შესაძლებელია მაღალხარისხოვანი ფოლადის მიღება და მასზე მოთხოვნის დაკმაყოფილება. ამიტომ ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებამ ფართო გასაქანი მიიღო და ინდუქციური დენების გარდა, სხვა საშუალებები და დანადგარებიც იქნა შექმნილი. თუ წინათ ღუმელსგარე დამუშავება მხოლოდ ფოლადის გამოდნობის დამხმარე საშუალებად ითვლებოდა, ახლა იგი დამოუკიდებელ მიმართულებად იქცა თხევადი ლითონის ტექნოლოგიურ დამუშავებაში. ღუმელი სულ უფრო და უფრო გადაიქცა მხოლოდ სადნობ აგრეგატად ნახევრადფაბრიკატის – თხევადი

ლითონის მისაღებად, ხოლო ყველა სხვა დანარჩენი ოპერაცია გადავიდა ღუმელსგარე აგრეგატებში. ამჟამად გამოთქმა „ღუმელსგარე დამუშავება“ მოიცავს ყველა ოპერაციას, ღუმელიდან ლითონის გამოშვებიდან მის ჩამოსხმამდე. ამ ოპერაციებში იგულისხმება ციცხეში განმუანგველ-მამოდიფიცირებული მასალების ჩამატებაც, ლითონში ფხვიერი მასალების შეყრქვევაც, ვაკუუმში განუანგვა-გაუნახშირბადოებაც. თხევადი ლითონის ღუმელსგარე დამუშავებით შეიძლება განხორციელდეს: თხევად ლითონში გახსნილი წყალბადის შემცველობის შემცირება იმ ზღვრებამდე, როცა ფლოკენების წარმოქმნა უვნებელიყოფა; ნახშირბადით განუანგვა; თხევად ლითონში სასურველი ტიპის არალითონური ჩანართების წარმოქმნა; ზუსტი ლეგირება; ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გათანაბრება ციცხეში; ჩვეულებრივი და მაღალლეგირებული შენადნობების ღრმა გაუნახშირბადება; განვოგირდება; შენადნობის დანახშირბადიანება. ჩამოთვლილი მიზნების მისაღწევად გამოიყენება ნეიტრალური ან აქტიური აირების შებერვა, მყარი ან თხევადი სინთეზური წიდებით ლითონის დამუშავება, ვაკუუმური დახალასება, ფხვნილისებრი მასალებით, განმუანგველებით და მოდიფიკატორებით ლითონის დამუშავება.

ბევრი საპასუხისმგებლო ფოლადის ან შენადნობის მიღება ღუმელსგარე დამუშავების გარეშე შეუძლებლად ითვლება. ღუმელსგარე დამუშავების ძირითადი ხერხები მოყვანილია სურათზე 10.22.

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების ერთ-ერთ მთავარ მიზანს წარმოადგენს ფოლადში გახსნილი არასასურველი მინარევების რაოდენობის მინიმუმამდე დაყვანა. ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების თანამედროვე პროცესები საშუალებას იძლევა შევამციროთ ლითონში აზოტისა და ნახშირბადის შემცველობა 0,002 %-ზე ქვევით; გოგირდი, ფოსფორი, უანგბადი 0,001 %-ზე ქვევით; წყალბადი – 0,00015 %-ზე ქვევით. მაგრამ ფოლადში გახსნილი ყველა ჩამოთვლილი ელემენტის ასეთ ზღვრებამდე ჩამოყვანა (მათი საერთო ჯამი არ აღემატება 0,007 %-ს) არ შეიძლება განხორციელდეს მხოლოდ ერთი პროცესით. საჭიროა ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების რამდენიმე ასეთი პროცესი. პრაქტიკაში რომელიმე ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების პროცესის შერჩევა ხდება იმისდა მიხედვით, თუ რა მოთხოვნაა წაყენებული გამოსადნობი მასალის მიმართ. ამრიგად, ლითონის ღუმელსგარე დამუშავება წარმოადგენს ერთობლივ (კომპლექსურ) ტექნოლოგიას.

ლითონის ერთობლივი ანუ კომპლექსური ღუმელსგარე დამუშავების ტექნოლოგია ვითარდება ორი მიმართულებით: 1) ცალკე-



სურ. 10.22. ფოლადის დარბაზის დამუშავების ძირითადი პრინციპები.

ული სისტემების გამოყენებით, როცა განსხვავებული ოპერაციები ხორციელდება სხვადასხვა დანადგარებზე. ციცხეი თხევადი ლითონით თანამიმდევრობით მიეწოდება ამ დანადგარებს; 2) მრავალმხრივი ანუ უნივერსალური სისტემის გამოყენებით, როცა განსხვავებული ოპერაციები ხორციელდება უძრავ ციცხეზე. ამასთან, შეიძლება ციცხეთან სხვადასხვა დანადგარების რიგრიგობით მიტანა. ანდა ეს დანადგარები გაერთიანებულნი არიან ერთიან მოწყობილობაში და მათ შეუძლიათ თხევადი ლითონი ციცხეში ერთდროულად დაამუშაონ რამდენიმე ხერხით.

ორივე მიმართულებას აქვს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მხარეები. პირველი მიმართულების უპირატესობად ითვლება ის, რომ შეიძლება გამოვიყენოთ მარტო საჭირო სისტემები და არა ყველა (თუ ცალკეული სისტემებით დამუშავებული ლითონი თავისი თვისებებით აკმაყოფილებს წაყენებულ მოთხოვნებს). მრავალმხრივი სისტემის გამოყენებისას კი შეიძლება საგრძობლად შევამციროთ ლითონის დამუშავების ხანგრძლივობა. ამ გარემოებას გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება მაშინ, როცა არ გამოიყენება ციცხე-ღუმელი.

თხევადი ლითონის ერთობლივი ანუ კომპლექსური ტექნოლოგიით დამუშავების მაგალითია ნოვოლიპეცკის მეტალურგიულ კომბინატში გამოყენებული დანადგარი VDM [105]. იგი ასრულებს შემდეგ ოპერაციებს: თხევადი ლითონის არგონით დამუშავებას ციცხეში ფოლადის ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გათანაბრების მიზნით; ფოლადის ქიმიური შედგენილობის დაყვანას (კორექტირებას) მანგანუმის, კაუბადის და სხვა ელემენტების სასურველ შემცველობამდე (ქიმიური შედგენილობით გამოწყვეული წუნის შემცირების მიზნით), მალევირებელი ელემენტების ხვედრითი ხარჯის შემცირებას და ფოლადის გამოდნობას ქიმიური შედგენილობის შევიწროებული ზღვრებით (ფოლადის კორექტირება ხდება ციცხეში ნატროვანი ფეროშენადნობების შეყვანით არგონით გაქრევისას); ფოლადის განუანგვას, ლევირებას და ქიმიური შედგენილობის დაყვანას ალუმინის სასურველი კონცენტრაციის მისაღებად (ალუმინი ციცხეში შეჰყავთ მავთულის ან ალუმინის ძელაკის მეშვეობით); ლითონის დამუშავებას თხევადი კიროვან-თიხამიწოვანი სინთეზური წიდებით ლითონის ღუმელიდან გამოშვებისას; ლითონის რაფინირებას და მოდიფიცირებას სილიკოკალციუმის ფხენილის შებერვით (ფხენილი თხევად ფოლადში შეჰყავთ ჰაერის სპეციალური კონსტრუქციის კომპრესორებით); ლითონის ქიმიური შედგენილობის დაყვანა (კორექციას) ნახშირბადის შემცველობის მიმართ (ამას აღწევენ ნახშირბადის შემცვე-

ლი მასალების შებერვით); ლითონის მიკროლეგირებას ნიობიუმით ან სხვა ელემენტებით, რომლებიც შეჰყავთ ციცხვში ფხვნილოვანი მასალების ან არგონის შებერვისას.

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების აღწერილი ხერხით შესაძლებელია ფოლადის ქიმიური შედგენილობის მართვა (მისი სამარკო ზღვრების ფარგლებში) და ამ გზით – მექანიკური თვისებების ქვედა ზღვრების გაზრდა, რასაც უნდა მოჰყვეს მანქანათმშენებლობის მიერ დასამზადებელი ნაწარმის ლითონ-ტევადობის შემცირება.

სხვანაირად არის გადაწყვეტილი თხევადი ლითონის ღუმელს-გარე დამუშავება ინგლისის ერთ-ერთ ქარხანაში [106]. ელექტრო-ფოლადსადნობ საამქროში (100 და 150 ტ ტევადობის ღუმელებით) დადგეს კომპლექსური დანადგარი რკალური გახურებისას ფოლადის ვაკუუმური დეგაზაციისა და დახალასებისთვის. დანადგარი წარმოადგენს დახშულ მოცულობას ანუ კამერას, რომელსაც ზემოდან ეხურება კამარა. ამ კამარაში გაკეთებულია 3 ნახერვტი ელექტროდებისათვის და ერთიც – დანამატებისათვის, რომელთაც მიერთებულია 13 ხეიმირი-დოზატორი (ბუნკერ-დოზატორი). კომპლექსური დანადგარის ტრანსფორმატორის სიმძლავრეა 16 მგვ.ა. ციცხვი ამოგებულია მაღალთიხამიწა ცეცხლგამძლე მასალით. წიდის დონეზე – პერიკლაზნახშირბადიანი ფილებით. ნარჩენი წნევა კამერაში შეადგენს 70 პა. ვაკუუმირების გარდა ციცხვში ხდება ლითონის ლეგირება, გახურება და შენადნობის ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გაერთგვაროვნება არგონის შებერვით. ციცხვის მედეგობა შეადგენს ~ 25 დნობას.

კომპლექსური დანადგარი საფრანგეთში [107] დადგმულია ელექტროფოლადსადნობ საამქროში, სადაც არის 60 ტ ტევადობის ორი ღუმელი, ტრანსფორმატორით 32 მგვ.ა. კომპლექსურ დანადგარს შეუძლია ლითონის გახურება, ვაკუუმირება, ლეგირება. ლითონში აირებისა და ფხვიერი მასალების შებერვა-შეფრქვევა. ასეთი დანადგარის გამოყენებამ გაზარდა საამქროს წარმადობა. გააუმჯობესა გამოდნობილი ფოლადის ხარისხი და შეამცირა ფოლადის ნაშადის მისაღებად გაწეული ხარჯი 32 აშშ დოლ/ტ-ით.

ფოლადის მიღების კომბინირებული ხერხი, რომელიც მოიცავს ჯერ მის გამოდნობას რკალურ ღუმელში, შემდეგ – დახალასებას ციცხვ-ღუმელში და ცირკულაციურ ვაკუუმირებას (დაყენებულია იაპონიის ერთ-ერთ ქარხანაში) [108]. საამქროში დგას 90 ტ ტევადობის რკალური ღუმელი 70 მგვ.ა ტრანსფორმატორით (დნობის ხანგრძლივობა – 75 წთ), ციცხვ-ღუმელი 12 მგვ.ა ტრანსფორმატორით (დახალასების ხანგრძლივობა 30–60 წუთი).

ციკულები ციკულები ვაკუუმირების ვაკუუმატორი (ვაკუუმირების ხანგრძლივობაა – 20–60 წუთი). რკალურ ღუმელში ხდება ჯართის გადნობა და განფოსფორება. იმისათვის, რომ განფოსფორება რაც შეიძლება ბოლომდე წაეიდეს, ღუმელიდან ციკხეში წიდასთან ერთად უშვებენ გაუქანბაჟ ფოლადს. შემდეგ ამ წიდას ხდიან და ლითონს გადაასხამენ ციკხე-ღუმელში. მასში ატარებენ განჟანგვას, ლეგირებას და აგრეთვე დახალასებას აღმდგენელი წიდებით არგონით ლითონის გაქრევის გამოყენებით. დახალასებისას ლითონში მცირდება ჟანგბადის, გოგირდისა და არალითონური ჩანართების რაოდენობა; იზრდება ლითონის ტემპერატურა შემდგომი ოქსიდაციების ჩატარების უზრუნველსაყოფად. ვაკუუმატორში ხდება ლითონის საბოლოო დეგაზაცია. ღუმელსგარე დახალასებისას ჟანგბადის რაოდენობა მცირდება 0,016 %-დან (ციკხე-ღუმელში ლითონის დამუშავების დაწყებამდე) 0,002 %-მდე (ვაკუუმით დამუშავებამდე) და 0,001 %-მდე ვაკუუმირების შემდეგ. ციკხე-ღუმელში კაუბადის ათვისება ხდება 60 %-ით, მანგანუმის – 55 %-ით, ქრომის – 100 %-ით და ალუმინის – 50 %-ით. წიდის 3–4 ფუძიანობისას არგონის ინტენსიური შებერვით გოგირდის შემცველობა ლითონში 40–50 წუთის შემდეგ მცირდება 0,001 %-მდე.

იაპონიის ერთ-ერთ ფირმაში [109] შემუშავებულია მცირე რაოდენობით სპეციალური ფოლადების მიღების ტექნოლოგია ციკხე-ღუმელის გამოყენებით. განფოსფორებას აწარმოებენ კონვერტერიდან ლითონის გამოშვების შემდეგ. ამისათვის ამცირებენ ფოლადის ტემპერატურას. ციკხე-ღუმელს შეუძლია დაამუშაოს ერთდროულად 250 ტ ლითონიც და 100 ტონაც. იგი აღჭურვილია 20 მგვ.ა სიმძლავრის ტრანსფორმატორით, ხოლო ელექტროდების დიამეტრია 406 მმ. ლითონის არევა ხდება ნეიტრალური აირებით. ციკხე-ღუმელის დანადგარი ახლოს დგას პორციული ვაკუუმირების (PH) დანადგართან და მასთან ერთად შეადგენს ერთიან კვანძს. დანადგარებზე გაწეული ხარჯების შესამცირებლად მალეგირებელი ელემენტების დამატებას ახდენენ PH-დანადგარზე. ამ ტექნოლოგიით შესაძლებელია ლითონს მოცილდეს 20-დან 70 %-მდე გოგირდი და შემცირდეს მისი კონცენტრაცია მზა ფოლადში 0,002 %-მდე, თუ საწყისი შემცველობა 0,004 % იქნება. ფოსფორის, აზოტისა და ჟანგბადის შემცველობა ციკხე-ღუმელში და ვაკუუმირებით დამუშავების შემდეგ ეცემა შესაბამისად 0,006, 0,003, 0,002 %-ზე ქვემოთ.

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების განსაკუთრებით სრული კომპლექსი გამოიყენება იაპონიის ფირმაში „ნიპონ კოკან“. აქ შემუშავებულ ტექნოლოგიას ეწოდება NK-AP (Nippon Kokan Arc

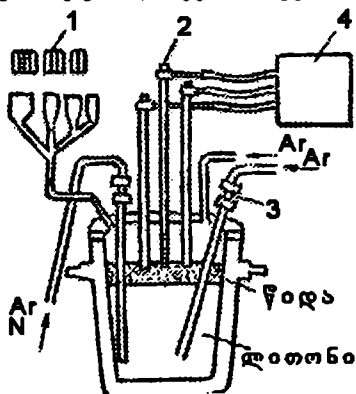
Process - „ნიკონ კოკანის რკალური გახურების პროცესი“). კომპლექსის საფუძველს წარმოადგენს მრავალფუნქციური დანადგარი ციციხე-ღუმელი, რომელიც საშუალებას იძლევა მოქნილად გამოვიყენოთ სხვადასხვა ხერხი გამოსადნობი ფოლადისადმი წაყენებული მოთხოვნების მიხედვით [110].

ლითონის დახალასება წარმოებს ციციხე-ღუმელში ტრანსფორმატორის სიმძლავრით 40 მგვა. ციციხეს თავზე ეხურება წყლით საცივებელი კამარა სამი ელექტროდით (თითოეულის დიამეტრია 360 მმ). ლითონის ტემპერატურის გასათანაბრებლად აირს ზემოდან უბერავენ.

მალეგირებლებისა და ამწიდველების შესაყენად დადგმულია 9 ხეიმირი-დოზატორი. ფეროშენადნობები შეჰყავთ ნეიტრალურ ატმოსფეროში, რისთვისაც წყლით საცივებელი კამარიდან ციციხეში მიაწოდებენ არგონს. კამარიდან შეჰყავთ აგრეთვე თხევად ლითონში ჩასაშვები ორი ქშინი. ერთი შევეულად – არგონით ან აზოტით ლითონის არევისათვის გახურებისას და მეორე – არგონის ჭაელით განმაგოგირდებლების შეფრქვევისათვის.

წიდა შეიძლება მოიხადოს მთლიანად ან ნაწილობრივ და შეიქმნას ახალი წიდა. მალეგირებელი ელემენტების შეთვისების გასაზრდელად და ფოსფორის უმცირეს რაოდენობამდე დასაყვანად წიდას ხდიან ვაკუუმური გამწოვების საშუალებით. ლითონის ტემპერატურა რეგულირდება ავტომატურად. სქემა მოყვანილია სურათზე 10.23. ციციხე-ღუმელს

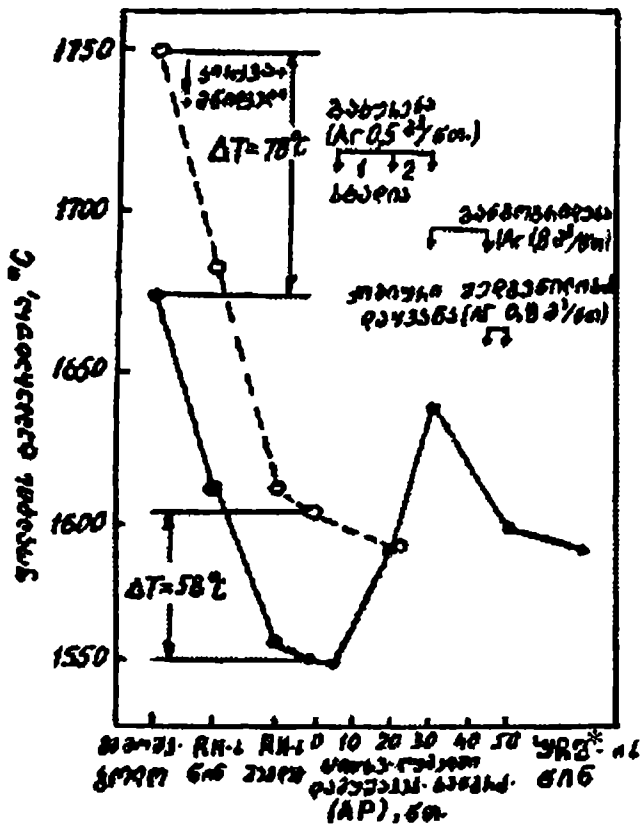
(AP) და ვაკუუმატორს, რომელთაც განსხვავებული ტექნოლოგიური შესაძლებლობები აქვთ, შეუძლიათ იმუშაონ ერთად, რითაც შეიძლება ბევრი მეტალურგიული ამოცანის გადაწყვეტა და სტაბილურად მაღალი ხარისხის ფოლადის წარმოება. კომპლექსურ დანადგარზე NK-AP წარმატებით ხორციელდება წყალბადისა და აზოტის მოშორება, გაუნახშირბადოება, განგოგირდება, განფოსფორება, ჩანართების მოშორება, ზუსტი და ეკონომიური ლეგირება, ლითონის გახურება და მისი ტემპერატურის რეგულირება. კომპლექსის წარმადობა 104,0 ათასი ტონაა თვეში. ოპერაციების თანამიმდევრობა და ერთობლიობა შეიძლება



სურ. 10.23. NK-AP დანადგარის სქემა: 1. მალეგირებლების და ამწიდველების ხეიმირი; 2. ელექტროდები; 3. ფხვიერი მასალების შესაბერი ქშინი; 4. ტრანსფორმატორი

იცვლებოდეს ნებისმიერ ზღვრებში. იგი დამოკიდებულია მხოლოდ გამოდნობილი ლითონის ხარისხის მიმართ წაყენებულ მოთხოვნებზე.

თხევადი ლითონის დამუშავების ხანგრძლივობა დამოკიდებულია გამოყენებული ოპერაციების სახესა და დანიშნულებაზე. მაგალითად, ლითონის გახურებას და ლეგირებას სჭირდება 30 წუთზე ნაკლები. განგოგირდებას – 50 წუთზე ნაკლები. განყოსფორებას – 15 წუთზე ნაკლები. ამასთან, შესაძლებელია ცალკეული ოპერაციების დამთხვევა. სურათზე 10.24 მოყვანილია ფო-



სურ. 10.24. NK-AP პროცესის ტექნოლოგიური სქემა და ფოლადის ტემპერატურის ცვლილება (წვევტილი ხაზით – PH+წყველებრივი განგოგირდება; მთლიანი ხაზით PH+AP)

* უნმ - უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა

ლადის წარმოების მაგალითები ჩვეულებრივი განგოგირდებითა და NK-AP ხერხით, რომლის დროსაც ლითონში რჩება გოგირდის უმცირესი რაოდენობა. ფოლადი, რომელსაც ამუშავევენ NK-AP ხერხით, გამოშვებულია კონვერტერიდან 78 °C-თი უფრო ნაკლები ტემპერატურით, ვიდრე ჩვეულებრივი.

გამოშვებისას ციცხეში დამატებული იყო გამომწვარი კირი 2-5 კგ/ტ და სინთეზური წიდა. ვაკუუმატორით წყალბადის ნაწილობრივ მოცილებისა და განჟანგვის შემდეგ ლითონი გადაეცემა ციცხეში ფოლადის გახურების დანადგარს. ლითონის დამუშავება ამ დანადგარზე მოიცავს ფოლადის გახურებას, განგოგირდებას და ზუსტ ლეგირებას. გახურებისას ლითონის არევა ხდება არგონის შებერვით. მისი ხარჯია (სინქარე) 0,4-0,6 მ³/წთ. განგოგირდებისას, ფოლადისა და წიდის ერთმანეთში ინტენსიურად არევისათვის, გამოიყენება სპეციალური ქმინი, რომლითაც არგონს 1,8-2,0 მ³/წთ სინქარით უბერავენ. არგონის ინტენსიური შებერვა გრძელდება 15 წუთს. ლეგირებისას შებერილი არგონის ხარჯს ამცირებენ 0,8 მ³/წთ-მდე. ფეროშენადნობების მიცემას ცდილობენ იმ ადგილებში, სადაც წიდა არ არის. ფეროშენადნობების შეყვანის შემდეგ ლითონი რომ არ გადაჯერდეს აზოტით და გაიზარდოს მალეგირებლების ათვისების ხარისხი, ლითონში წყლით საცივებელი ქმინით უბერავენ არგონს 1 მ³/წთ სინქარით. NK-AP ტექნოლოგია ითვლება ერთ-ერთ საუკეთესოდ სხვადასხვა დანიშნულების მცირედლეგირებული ფოლადების წარმოებისას.

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების შესაძლებლობები ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის ათვისებული. ამ აზრის დამადასტურებელია ის გარემოება, რომ მათი სახეები უამრავია. მაგალითად, იგივე იაპონური ფირმა „ნიპონ კოკანის“ სხვა ქარხანაში, სადაც მუშაობს 250 ტ ტევადობის 3 კონვერტერი და 50 ტ ტევადობის 1 რკალური ღუმელი [111], დადგმულია პორციული ვაკუუმატორი. ვაკუუმ-რკალური (VAD) და ვაკუუმ-ჟანგბადის (VOD) გაუნახშირბადობის დანადგარები, კომპლექსური დახალასების დანადგარი NK-AP ფხენილისებრი მასალების შებერვით, ლეგირებით. არგონით არევის და წიდის ვაკუუმური მოხდით. ქარხანა უშვებს ფურცლებს და უნაკერო მილებს, ნახშირბადიან, მცირედლეგირებულ და ლეგირებულ (ქრომიან, ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენიან, კოროზიამდეგ ფერიტულ, ატომური ენერგეტიკის, არქტიკულ და საზღვაო რეწვის) ფოლადებს. ლითონის მაღალ მედეგობას გარემოსა და წყალბადით გამყიფების მიმართ უზრუნველყოფს ღუმელსგარე დამუშავების კომპლექსური მეთოდების გამოყენება. იგი ხელს უწყობს მინარევებისა და აირების შემცველობების

დაყვანას უმცირეს დონემდე და ლითონში ჩარჩენილი არალითონური ჩანართების მოყვანილობის მოწესრიგებას. წარმოების ოპტიმიზაციის მიზნით მიმართავენ 250 ტონიანი დნობის დაყოფას მცირე, 50 ტონიან ულუფებად, რომელთაგან თითოეულს ჯერ ამუშავენ VAD და VOD დანადგარებზე, შემდეგ კი ურევენ რკალური ღუმელიდან გამოშვებულ ლითონს. მაგალითად, კოროზიამდეგი ფოლადის გამოდნობისას, რკალურ ღუმელში ადნობენ მაღალნახშირბადიან ფეროქრომს და მობრუნებულ ლეგირებულ ჯართს, შენადნობს გააუნახშირბადობენ VOD დანადგარებზე, ურევენ მასში არალეგირებულ ლითონს, დაახალასებენ NK-AP დანადგარზე და, თუ საჭიროა, დაამუშავენ RH დანადგარზეც.

დანადგარს „ციცხე-ღუმელი“ იყენებენ იმ შემთხვევაში, თუ უნდათ მიიღონ ლითონი გოგირდისა და ფოსფორის განსაკუთრებულად დაბალი შემცველობით. თუ საჭიროა განსაკუთრებით მცირე გოგირდის შემცველი ლითონის მიღება, მაშინ გამოიყენებენ განგოგირდებულ თუჯს, რომელშიც გოგირდის შემცველობა არ აღემატება 0,002 %-ს. დნობა მთლიანად თუჯზე მიჰყავთ (ჯართიდან გოგირდის გადასვლის თავეიდან ასაცილებლად). ციცხეში გადმოსხმისას ლითონს აშორებენ წიდას ვაკუუმური გამწოვებით და შემდეგ მიაქვთ ლითონი ციცხე-ღუმელში ახალი წიდის დასაყენებლად (60 % CaO, 30 % Al₂O₃ და 10 % SiO₂). ლითონის ზედაპირზე დაყრიან კირს, ვოლასტონიტს და ბოქსიტს (სულ 12 კგ/ტ), ლითონში არგონის საშუალებით შეკაყავთ ფხენილისებრი SiCa (0,5-0,7 კგ/ტ), ხოლო 4-5 °C/წთ სიჩქარით გახურებისას ლითონს გააქრევენ არგონით. ამ გზით ღებულობენ ფოლადს გოგირდის განსაკუთრებულად დაბალი შემცველობით: კონვერტერიდან გამოშვებისას 0,0010-0,0025 %, ხოლო ჩამოსხმის წინ 0,0005 %-ზე ნაკლები (უმეტეს შემთხვევაში 0,00015-0,00045 %). გოგირდის განაწილების კოეფიციენტი წიდასა და ლითონს შორის აღწევს 140-180-ს.

თუ საჭიროა ლითონის გამოდნობა ფოსფორის განსაკუთრებით დაბალი შემცველობით (არაუმეტეს 0,005 %-სა), მაშინ დნობა კონვერტერში მიჰყავთ წინასწარ განფოსფორებულ თუჯზე. გამოშვებისას და ციცხე-ღუმელში ლითონს ამუშავენ ისეთი განმაფოსფორებელი ნარევებით, რომლებიც უზრუნველყოფენ შემდეგი შედგენილობის წიდის მიღებას: 45-55 % CaO; 35-55 % (FeO+MnO); 5-15 % (SiO₂+Al₂O₃+P₂O₅). ციცხე-ღუმელში დამუშავება უზრუნველყოფს განმჟანგველ-მალეგირებლების კარგ ათვისებას და საშუალებას იძლევა შევამციროთ კონვერტერიდან გამოშვებული ფოლადის ტემპერატურა 60-70 °C-ით.

~ VAD და VOD დანადგარებზე მუშავდება ის ლითონი, რომელიც მიდის მსხვილ ფურცლებზე, ატომურ რეაქტორებსა და იმ ნაწარმზე, რომელთა გამოყენებაც ხდება დაბალ ტემპერატურაზე. „რკალური ღუმელი – VAD და VOD“ სქემა კი გამოიყენება მაღალლევორებული ფოლადების მისაღებად.

VAD პროცესით დამუშავებას სჭირდება 60–150 წთ (დამოკიდებულია ფოლადის ქიმიურ შედგენილობაზე). ამავე დროს დეგაზაცია და ლეგირების გარდა ხდება განვითარებაც, რადგან პროცესი მიმდინარეობს მაღალფუძიანი წიბებით და არგონით ხდება ლითონის არევა. რკალით ლითონის გახურება შეიძლება მოხდეს ერთხელ ან ორჯერ.

VOD პროცესის ხანგრძლივობა 120–140 წუთია. ქრომის შემცველი კოროზიამედეგი შენადნობის მისაღებად (0,04–0,06 %C) ტარდება გაქრევა ჟანგბადით (800 მ³/სთ სინქარით) 9 კპა წნევის ქვეშ, ლითონის საწყისი ტემპერატურისას 1580 °C. ჟანგბადით გაქრევას ამთავრებენ მაშინ, როცა ნახშირბადის შემცველობა დავა 0,03 %C-მდე. შემდგომში გაუნახშირბადობა და წიდიდან ქრომის აღდგენა მიმდინარეობს 0,66 კპა წნევისას არგონით გაქრევით. დამუშავების ბოლოს ახდენენ ლითონის ქიმიური შედგენილობის დაყვანას და აწარმოებენ დამატებით დეგაზაციას მაღალი ვაკუუმის ქვეშ. ჟანგბადით გაქრევის დამთავრების შემდეგ ლითონის ტემპერატურა საგრძნობლად ეცემა, რის გამოც ხშირად უწევთ ციციხის გადაცემა VAD დანადგარზე.

ამრიგად, ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების პროცესების განვითარებამ თითქმის მთლიანად უარყო მოსასწრაფი იმის შესახებ, რომ მათი გამოყენება მიზანშეწონილია მხოლოდ განსაკუთრებით მაღალხარისხოვანი ფოლადების მისაღებად. ამჟამად ღუმელსგარე დახალასება წარმოადგენს არალითონური ჩანართების მორფოლოგიის კონტროლის, ქიმიური შედგენილობისა და ტემპერატურის ზუსტი დაყვანის ფართოდ გავრცელებულ საშუალებას. ღუმელსგარე დამუშავებამ ხელი შეუწყო უწყვეტ საწარმოსხმო მანქანებზე მრავალი სახის ფოლადის ჩამოსხმას. მაგრამ ეს გარემოება არ ნიშნავს, რომ მიზანშეუწონელია მისი გამოყენება იქ, სადაც ლითონი ბოყებში ისხმება. ასეთ ადგილებში ღუმელსგარე დამუშავების რაციონალურმა გამოყენებამ შეიძლება გავლენა მოახდინოს არა მარტო საბოლოო პროდუქტის ხარისხზე, არამედ ფოლადის ნახევარფაბრიკატის მიღების ადრინდელ სქემებზე.

ფოლადის დნობის ტექნოლოგიის ბევრი ოპერაცია, რომლებიც აუცილებლად ითვლებოდა ღუმელსგარე დამუშავების გამოყენებამდე, უკვე აღარ მიიჩნევა საჭიროდ. მეტიც, სოფი მათგანი არა

მარტო გამოუსადეგარად ითვლება, არამედ უარყოფით გავლენასაც ახდენს ღუმელსგარე დამუშავების ეფექტურობასა და გამოდნობილი ფოლადის თვისობრივ მაჩვენებლებზეც. ამიტომ ფოლადის დნობის ტექნოლოგიაში შეტანილი უნდა იყოს შესწორებები. რომლებიც ოპტიმალურს გახდიან მას. ამით მიიღწევა უფრო მეტი ტექნიკური და ეკონომიკური ეფექტი ღუმელსგარე დამუშავების უკვე არსებული ხერხების გამოყენებით.

ღუმელსგარე დამუშავების უპირატესობის უფრო უკეთესი გამოყენებისათვის საჭიროა მართვის ავტომატური სისტემები (განსაკუთრებით ლითონის ტემპერატურის, მასში ჟანბადის აქტიურობის, ქიმიური შედგენილობის, აირების შემცველობის სწრაფი შეფასებისათვის).

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ღუმელსგარე დამუშავების ტექნოლოგიას ჯერ კიდევ არ უთქვამს საბოლოო სიტყვა. ერთის მხრივ, ფოლადის ხარისხისა და თვისებებისადმი სულ უფრო გამკაცრებული მოთხოვნები და მეორეს მხრივ, სასურველი ხარისხისა და თვისებების ფოლადის მიღებისათვის უმცირესი ხარჯების გაწევისათვის, სულ უფრო და უფრო იხვეიწება ღუმელსგარე დამუშავების ხერხები და იქმნება ახალი ტექნოლოგიები.

მაღალქრომიანი უჟანგავი ფოლადის წარმოებისათვის შემოთავაზებულია გაუნახშირბადოების ხერხი. იგი გამოიხატება ღუმელიდან გამოშვებული ლითონის ჭავლის დამუშავებაში ჟანგბადით და არგონით [112]. ამისათვის გამოსაშვები ხერხელის ირგვლივ მისი ღერძის კონცენტრულად აყენებენ რგოლისებრ აირგამანაწილებლებს. აირგამანაწილებლებს უყენებენ საქშენებს, რომლებიც განლაგებულია კუთხით ჭავლის მიმართ, მისი მოძრაობის მიმართულებით. პირველად ჭავლის მოძრაობის მიმართულებით აწვდიან არგონს, შემდეგ კი ჟანგბადს. ჭავლი განიცდის დისპერსირებას, ხოლო ჟანგბადისა და ფოლადის ურთიერთქმედების ადგილს გარს ერტყმის არგონი. დისპერსირების გამო იზრდება ლითონის აირებთან შეხების ზედაპირი, რაც აჩქარებს ფოლადში გახსნილი ნახშირბადის დაჟანგვას. არგონი, თავის მხრივ, წარიტაცებს წარმოქმნილ ნახშირჟანგს, რის გამოც უკანასკნელის პარციალური წნევა რეაქციის ზონაში მცირდება და ნახშირბადის დაჟანგვის სიჩქარე იზრდება. ამის გამო ლითონში გახსნილი ქრომისა და სხვა ელემენტების დაჟანგვის სიჩქარე მცირდება. ავტორების აზრით, სხვა, ასეთივე დანიშნულების ხერხებთან შედარებით, საგრძნობლად იზრდება მალეგირებელი ელემენტების გამოყენების მაჩვენებლები.

შემუშავებულია აგრეთვე ღუმელსგარე დამუშავებისას ლითონის პულსაციური არევა [113]. ამ პროცესს აღნიშნავენ PM-ით. იგი დაფუძნებულია თხევადი ლითონისადმი ისეთივე ენერჯის გადაცემაზე, როგორცაა ცირკულაციური ან პორციული ვაკუუმირებისას. უკანასკნელ შემთხვევაში დამუშავებული ლითონის უღუფები მცირეა. დამუშავების ამ ხერხის ახრი იმაში მდგომარეობს, რომ ლითონში შეაქვთ ცეცხლგამძლე მილი, რომელშიც იტვირთება დასამატებელი მასალები და სპეციალური მოწყობილობით აწარმოებენ ინერტული აირების ჩატუმბვას და ამოტუმბვას. წნევის ცვლილებების გამო ლითონის დონე ცეცხლგამძლე მილში იცვლება და ციციხეში ხდება ლითონის ინტენსიური არევა. ცეცხლგამძლე მილში წნევის ზღვრები შეადგენს 0.05–0.15 კა-ს.

მაგალითად, 100 ტ ლითონის დამუშავებისათვის ცეცხლგამძლე მილის შიდა დიამეტრს იღებენ 300 მმ-ს, გარეს – 600 მმ-ს. მილის სიმაღლეა 3000 მმ, აირის წნევა – 1 მგპა. ამოტუმბვისას ტუმბოს წარმადობაა 10 მ³/წთ. აირის მაღალი წნევით შეყვანის ხანგრძლივობაა 1 წამი. ამოწოვის ხანგრძლივობაა – 5 წამი. ცეცხლგამძლე მილი ლითონში ჩაშვებულია 500 მმ-ზე. ლითონის არევის ხვედრითი სიმძლავრეა 500 ვტ/ტ-ზე, რაც დაახლოებით ცირკულაციური ვაკუუმირების ტოლია. ცირკულაციურ და პორციულ ვაკუუმირებასთან შედარებით, პულსაციური არევის ხერხი შესამჩნევად უფრო ეკონომიურია (მცირდება ენერჯის ხარჯი, ცეცხლგამძლე მასალების ხვედრითი ხარჯი, ლითონის ტემპერატურის ვარდნა დამუშავების პროცესში).

პულსაციური არევის ხერხის გამოყენება იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა მხოლოდ ლითონის განუხანგვა და მისი ტემპერატურისა და ქიმიური შედგენილობის გათანაბრება, გაცილებით უფრო მიზანშეწონილია, ვიდრე ვაკუუმური ხერხების. პულსაციური დამუშავების კიდევ ერთ უპირატესობას ის წარმოადგენს, რომ ლითონის ინტენსიური არევისას (რასაც იწვევს ცეცხლგამძლე მილში ლითონის განივი გადაადგილება) მოძრაობაში მოდის ძირითადად ციციხის ფსკერზე არსებული ლითონი. წილისა და ლითონის გამყოფ ზედაპირზე არევის ძალები შეუმჩნეველია და ამიტომაც არ ხდება წილის არევა ლითონში. მალეგირებელი ელემენტების ათვისება აღნიშნული ხერხის გამოყენებისას შეადგენს 85 %-ს, რაც PH პროცესის დონეზეა, ხოლო საწარმოო ხარჯები უფრო დაბალია და უტოლდება არგონით შებერვისათვის გაწეულ ხარჯებს. პულსაციური არევის დანადგარზე გაწეული ხარჯები შეადგენს PH პროცესისას გაწეული ხარჯების 1/3-ს, ხოლო ტექნოლოგიური კი – 1/7-ს. ამასთან ტექნოლოგიური ხარჯების 75 % მოდის ცეცხლგამძლე მასალებზე.

იაპონიის ერთ-ერთი გამოგონება [114] გულისხმობს სადნობ დანადგარზე საერთოდ უარის თქმას და ფოლადის დამუშავების ყველა ოპერაციის ჩატარებას უნიფიცირებულ (გაერთიანებულ) ციცხეში. ციცხე იღებება ურიკაზე. ურიკა მოძრაობს ლიანდაგზე და შეუძლია მივიდეს სხვადასხვა დანიშნულებებით აღჭურვილ სტენდებთან. ციცხეში ტვირთავენ მყარ ლითონურ ჯართს, ახურავენ სახურავს, რომელშიაც გადის აირის სანთურა. ციცხეი გახურებული კაზმით გადაეცემა სხვა სტენდს, სადაც ეხურება სახურავი-კამარა, რომელშიც ელექტროდები გადის. კაზმის გადნობისა და სათანადო ტემპერატურამდე გახურების შემდეგ ციცხეს გადაიტანენ შემდეგ სტენდზე, ახურავენ პერმეტულ სახურავს, რომელშიც გადის ქშინი. ქშინით ლითონში უბერავენ კირსა თუ სხვა ამწიდველებს და განმჟანგველ-მალეგირებლებს. სახურავის მეორე ნახერტიდან ამოტუმბავენ აირებს, ქმნიან ეაკუუმის და ამით აწარმოებენ ლითონის დეგაზაციას. სასურველ ქიმიურ შედგენილობასა და ტემპერატურამდე ლითონის მიყვანის შემდეგ ციცხეი გადააქვთ საჩამოსხმო მანქანაზე.

ზოგიერთი დანიშნულების (მათ შორის ზღვის წყალში მომუშავე ნაკეთობების) ლითონის თვისებებზე არაალითონური ჩანართების გავლენის შემცირებისათვის მათ უცვლიან სახეს (აწარმოებენ მოდიფიცირებას). მაგალითად, სულფიდების სახეცვლილებებისათვის ისინი გადააქვთ ძნელდნობად ნაერთებში. ეს ნაერთები არ უნდა იცვლიდნენ სახეს ცხელი გლინვისას (გოგირდი გადააქვთ კალციუმის, იშვიათ მიწათა ლითონების და სხვა სულფიდებში). მათგან ყველაზე გავრცელებულია კალციუმით მოდიფიცირება. არსებობს მისი რამდენიმე ხერხი: სილიკოკალციუმის ფხენილის შეფრქვევა თხევად ლითონში; რკინის სალტეში მოთავსებული სილიკოკალციუმის მავთულის შეყვანა თხევად ლითონში; ნაჭროვანი სილიკოკალციუმის ჩაყრა; სილიკოკალციუმის ტყვიების შეტყორცნა ლითონში.

აღრე, სილიკოკალციუმის ფხენილის შებერვისას, მას იღებდნენ ისეთი რაოდენობით, რომ მომხდარიყო განგოგირდებაც და გოგირდოვანი ჩანართების მოდიფიცირებაც. შემდგომში განგოგირდებას აწარმოებდნენ კირის შემცველი წიდისწარმოქმნელებით (რაც უფრო იაფია) და შემდეგ, არაალითონური ჩანართების მოდიფიცირებას სილიკოკალციუმით. ყველაზე კარგ შედეგს იძლევა სილიკოკალციუმის მავთულით შეყვანა, რადგან ნაჭროვანი სახით გამოყენებისას ეცემა ათვისების ხარისხი და სასურველი შედეგი ყოველთვის ვერ მიიღება. სილიკოკალციუმის ტყვიების ტყორცნა თხევად ლითონში თითქოს უნდა ამაღლებდეს მისი ათვისების

უნარს, მაგრამ ჯერჯერობით უსაფრთხოების გამო ფართოდ არ გამოიყენება. მოდიფიკატორად კალციუმის გარდა შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვა ელემენტებიც ან მათი შენადნობები.

თბოდანაკარგების შემცირების მიზნით [115] ფხვნილისებრი მასალების შებერვისას შეიძლება გამოყენებული იქნეს გახურებული აირი; თანაც აირის ტემპერატურა თხევადი ფოლადის ტემპერატურასაც შეიძლება აღემატებოდეს.

ბელგიაში შემუშავებულია ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების ხერხი, რომელსაც ეწოდება „Ca-Fe-LOI პროცესი“ [116]. ამ პროცესისას გამოიყენება ღრუ ცილინდრის ფორმის მოდიფიკატორი, რომელიც წარმოადგენს კალციუმისა და რკინის ნარევის ნაწნებს. ცილინდრს ჩამოაცვამენ ლითონის ძელაკზე, რომელიც დაფარულია ცეცხვამძლე მასალით. შემდგომ ამ ძელაკის საშუალებით ცილინდრ-მოდიფიკატორს ჩაუშვებენ ლითონით სავსე ციცხვში თითქმის მის ძირამდე, ანდა შეიძლება ლითონის გამოშვებამდე ცილინდრი დაამაგრონ ციცხვის ძირზე. კალციუმის რაოდენობა ჩვეულებრივ 20 %-მდეა. ცილინდრ-მოდიფიკატორში რკინისა და კალციუმის გარდა შეიძლება იყოს სხვა მოდიფიკატორებიც. Ca-Fe-LOI მეთოდი, ავტორების აზრით, ყველაზე მოხერხებული საშუალებაა ლითონის კალციუმით დამუშავებისას, რადგან შესაძლებელია ლითონში მისი ხსნადობის სიჩქარის რეგულირება. რეაქცია იწყება ციცხვში ცილინდრის ჩაშვებიდან 2-3 წუთის შემდეგ, მიმდინარეობს წყნარად და მთავრდება 5-10 წუთის შემდეგ. ამ პროცესისას ლითონში წყალბადი არ იხსნება და არც მისი ტემპერატურა ვარდება. ამ ხერხით დამუშავებული ლითონი ხასიათდება მაღალის სისუფთავით არალითონური ჩანართების მხრივ. მათში არ არის სილიკატური და დიდი ზომის გლობულარული ჩანართები. თუმცა უანგბადის რაოდენობა რამდენადმე მაღალია. განსაკუთრებით კარგ შედეგს იძლევა ეს ხერხი იმ ფოლადებზე (ღრმა გამოჭიმვის, ცივი გამოჭვიფრის, შესადულებელ), რომლებიც არ შეიცავენ კაჟბადს. ასეთი ხერხით როგორც დამუშავებისას ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენიანი, ისე მაღალი წნევის ზემტკიცე სამილე ფოლადების 20-40 %-ით განივი მიმართულებით ამოჭრილი ნიშნულების დარტყმითი სიბლანტე იზრდება.

ამრიგად, ღუმელსგარე დამუშავების ძირითად მიმართულებად შეიძლება ჩაითვალოს ღუმელსგარე დამუშავების სხვადასხვა პროცესის შემსრულებელი დანადგარებისაგან შედგენილი კომპლექსების შექმნა.

ღუმელსგარე დამუშავებისათვის გამოყენებული ავრეგატების სახეები და ტექნოლოგიური პროცესები განისაზღვრება გამოდნო-

ბილი ფოლადისადმი წაყენებული მოთხოვნებით და მათი ექსპლუატაციის პირობებით.

ლითონის ღუმელსგარე დამუშავების კომპლექსები შეიძლება შედგებოდეს როგორც ცალკეული მოდულებისაგან (სისტემებისაგან), რომელთა გამოყენება შეიძლება სხვადასხვა თანამიმდევრობით (რასაც განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა ენიჭება იმ საამქროებოსათვის, რომლებიც მრავლად აღნიშნენ სხვადასხვა მარკისა და შესაბამისად, დანიშნულების ფოლადს), ასევე უნივერსალური, ანუ მრავალმხრივი სისტემებისაგან, რომელთა გამოყენება ამცირებს ლითონის დამუშავების ხანგრძლივობას (მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს იმ საამქროებში, სადაც დნება მაღალხარისხოვანი, მაგრამ არა ფართო ასორტიმენტის ფოლადები).

ღუმელსგარე დამუშავების ოპერაციები გამუდმებით უმჯობესდება. მათი სრულყოფა მიმართულია შენადნობზე ეფექტური გავლენის გასაზრდელად; მათზე განხორციელებული ენერგეტიკული და ეკონომიკური ხარჯების შემცირებისაკენ; ცეცხლგამძლე მასალების შექმნისაკენ (რადგან მათი ხარისხის ამაღლება ახალ გზებს უხსნის ღუმელსგარე დამუშავების ხერხებს). ღუმელსგარე დამუშავების ხერხებისა და გამოყენებული ტექნოლოგიის შერჩევა ყოველი კონკრეტული შემთხვევისათვის ინდივიდუალურად ხდება. ღუმელსგარე დამუშავების ამა თუ იმ ხერხის გამოყენების ძირითადი მაჩვენებლებია მომხმარებლის მოთხოვნები და საწარმოო დანახარჯების მინიმუმი.

თ ა ვ ი VII

ზემპლავრი რკალური ღუმელების ბამოყენების პერსპექტივა

ელექტრორკალურ ღუმელებში ფოლადის დნობის აუცილებლობა განპირობებული იყო იმ მიზეზით, რომ მხოლოდ ასეთ ღუმელებში იყო შესაძლებელი გაუმჯობესებული ხარისხის მაღალლეგირებული (უჟანგავი, მსურვალე, კოროზიამედეგი, სწრაფმჭრელი, კრეკინგული და სხვ.) ფოლადების მიღება. 1960 წლისათვის მსოფლიოში ელექტროღუმელებში გამოდნობილი ფოლადების რაოდენობა ფოლადის საერთო წარმოების მხოლოდ ~10 %-ს შეადგენდა, ხოლო მათი მაღალი ღირებულება გამოწვეული იყო

მხოლოდ და მხოლოდ ასეთი სორტამენტის ფოლადების მიღებისათვის ძვირი მალეგირებელი შენადნობების გამოყენებით.

შემდგომ წლებში ტრანსფორმატორების ხეივრითი სიმძლავრის გაზრდას, ღუმელების კონსტრუქციებისა და დნობის ტექნოლოგიების გაუმჯობესებას მოჰყვა რკალური ღუმელებში ნახშირბადიანი რიგითი მარკების ფოლადების დიდი რაოდენობით დნობა და შედეგად – გამოდნობილი ფოლადის ღირებულების შემცირება. ამის გამო ელექტრორკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ნახშირბადიანი ფოლადის ღირებულება დაუახლოვდა კონვერტერებში გამოდნობილი მსგავსი ფოლადების ღირებულებას. ამან გაზარდა ელექტროფოლადის კონკურენტუნარიანობა. ამ დროიდან მოყოლებული მეტალურგიულ წარმოებაში მომუშავე სპეციალისტები იწყებენ რკალური ღუმელების მიმავლის პროგნოზირებას. გასული საუკუნის 90-იან წლებში მეცნიერთა გათვლებით 2000 წლისათვის მსოფლიოში ელექტრორკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობას უნდა მიეღწია საერთო გამოდნობილი ფოლადების მხოლოდ 20–22 %-ისათვის. როგორც ცხივრებამ დაგვიჩაჩა, ეს პროგნოზი ძალიან მოკრძალებული გამოდგა და უკვე 1993 წლისათვის ელექტრორკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადების წარმოების დონემ მიაღწია მსოფლიოში საერთო გამოდნობილი ფოლადების 32 %-ს.

1995 წელს ლონდონში გამართულ მეტალურგთა ევროპის კონგრესზე ფოლადის წარმოების ზრდის პროგნოზირებასთან დაკავშირებით გამოითქვა არგუმენტირებული მოსაზრება ელექტრორკალურ ღუმელებში ფოლადის წარმოების განუხრელი ზრდის შესახებ. კერძოდ, ითქვა, რომ 2008–2010 წლისათვის რკალურ ღუმელებშიც იმდენივე ფოლადი გამოდნება, რამდენიც კონვერტერებში. ელექტრორკალურ ღუმელებში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობის ზრდა გარკვეულწილად დაკავშირებულია აირადი ჟანგბადის ხარჯის საგრძნობ ზრდასთან. რკალურ ღუმელებში გამოდნობილ 1 ტ ლითონზე ხშირად უფრო მეტი რაოდენობის ჟანგბადი იხარჯება, ვიდრე ჟანგბად-კონვერტერული პროცესისას. რკალურ ღუმელებში აირადი ჟანგბადი გამოიყენება მყარი ჯართის გასახურებლად და გასადნობად. აბაზანის გასაქრევად. გამომავალი აირების დასაჟანგად ჟანგბად-სათბობის სანთურებში. ყოველივე ამის გამო ხდება საერთო ენერჯიის ხარჯისა და გამოდნობილი ფოლადის თვითღირებულების შემცირება. რკალურ ღუმელებში ფოლადის წარმოების ზრდა ძირითადად დამოკიდებულია ჯართის რაოდენობასა და ხარისხზე. მართალია, რაც უფრო მეტი ფოლადი დნება მსოფლიოში, მით მეტი ჯართი ბრუნდება კვლავწარმოებაში გადასამუშავებლად, მაგრამ იმის გამო, რომ

ჯართი თანდათან ჭუჭყიანდება ისეთი ელემენტებით, რომელთა მოშორებაც ფოლადის დნობისას ან შეუძლებელია, ან მოითხოვს ძვირად ღირებულ ტექნოლოგიურ პროცესებს, შეუძლებელი ხდება მისი გამოყენება.

ამ გარემოებამ მოითხოვა ჯართის შემცველი მასალების ისეთი ნედლეულის შემუშავება, როგორიცაა მეტალიზებული გუნდები და განსაკუთრებით, რკინის კარბიდი. დნობისათვის მათი გამოყენება იზღუდება იმის გამო, რომ იზრდება ღუმელის ჩატვირთვის ხანგრძლივობა. თუმცა ბოლო ხანებში დაგეგმარებული ღუმელებმა (უწყვეტი ჩატვირთვით) შეიძლება გადაჭრას ეს საკითხი. რკინის კარბიდში ნახშირბადის მაღალი რაოდენობის გამო გამოიყოფა დიდი რაოდენობით ნახშირყანგი, რომლის დაწვასაც თან სდევს ამონაგის ცვეთა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ რკინის კარბიდში ნახშირბადის მაღალი შემცველობა სითბოს დამატებითი წყაროა. ჯართის საკითხის გადაწყვეტის ერთ-ერთი საშუალებაა თხევადი თუჯის გამოყენება. ამ შემთხვევაში თხევად თუჯში უმატებენ მეტალიზებულ გუნდებს და ნახშირბადს. ეს გარემოება გამორიცხავს სააგლომერაციო მანქანების გამოყენებას და შესაბამისად მცირდება მანეე გამოწყობები. თხევადი თუჯის გამოყენებისას არ უნდა დაგვაიწყდეს, რომ რკალური ღუმელების უპირატესობა კონვერტერებთან შედარებით მულაენდება სწორედ კაზმის ლითონურ ნაწილში 100 % მყარი ჯართის გამოყენების გამო. თხევადი თუჯის გამოყენება კი ზრდის გამოდნობილ ფოლადზე დახარჯული ჯამური ენერჯის რაოდენობას.

ამავე კონგრესზე აღნიშნული იყო, რომ 1995 წლისათვის მსოფლიოში მუშაობდა 1200-ზე მეტი ელექტრორკალური ღუმელი და საშუალოდ კვირაში ერთი ღუმელი შედიოდა მოქმედებაში. 1993 წლისათვის მსოფლიოში გამოდნობილი ფოლადის საერთო რაოდენობის ~32% მოდიოდა რკალურ ღუმელებზე. სოვიერთი ქვეყნისათვის ეს მაჩვენებელი უფრო მეტი იყო (იტალია ~70 %, აშშ ~40 %). 1960-1990 წლებში დნობის ხანგრძლივობა და ელექტროდების ხარჯი შემცირდა 4-ჯერ. თუკი დნობის ხანგრძლივობა შემცირდება ყოველ წელს 5 %-ით, რაც ამჟამად რეალურად ხდება თანამედროვე წარმოებაში, მაშინ რამდენიმე უახლოეს წელიწადში რკალურ ღუმელებში წარმოებული ფოლადის რაოდენობა გაუტოლდება კონვერტერებში გამოდნობილს. თუ ასეთი სისწრაფით განვითარდა რკალური ღუმელების კონსტრუქციები და გაიზარდა მათში გამოდნობილი ფოლადის რაოდენობა, მაშინ პროგნოზების მიხედვით 2010 წლისათვის ასეთი ღუმელები გახდება ფოლადის წარმოების ძირითადი დანადგარები.

ელექტრორკალური ღუმელების უპირატესობა იმაში გამოიხატება, რომ მათ სჭირდებათ გაცილებით ნაკლები კაპიტალური და საექსპლუატაციო ხარჯები სრული მეტალურგიული ციკლის ქარხნებთან შედარებით. 1995 წლისათვის ახალ ადგილზე სრული მეტალურგიული ციკლის ქარხნის მშენებლობის კაპიტალური ხარჯები შეადგენდა 700 აშშ დოლარს ტონა ფოლადზე, ხოლო რკალური ღუმელების ქარხნებისათვის – 100 აშშ დოლარს ტონა ფოლადზე. სრული ციკლის ქარხნის მოდერნიზაციაზე გაწეული ხარჯები შეადგენდა 400 აშშ დოლარს ტონა ფოლადზე, რკალურ-ღუმელებიანი ქარხნებისათვის – 50 აშშ დოლარს ტონა ფოლადზე. გარდა ამისა, რკალურღუმელებიანი ქარხნების საექსპლუატაციო ხარჯებიც ნაკლებია, განსაკუთრებით – სამუშაო ძალის ხარჯზე.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ გარემოებასაც, რომ რკალურღუმელებიანი ქარხნები გაცილებით ნაკლებ ზემოქმედებას ახდენს გარემოზე (ეს ხარჯები შეადგენს საერთო დანახარჯების 10 %-ზე მეტს) და მარტივად აკმაყოფილებს მომხმარებელთა მოთხოვნებს.

სრული მეტალურგიული ციკლისა და რკალურღუმელებიანი ქარხნების გარემოზე ზემოქმედების შედარებითი მონაცემები შემდეგნაირად გამოიყურება:

	ქარხნები სრული მეტალურგიული ციკლის	ელექტრორკალური ღუმელები
წილა, კვ/ტ	391	145
მტვერი, კვ/ტ	31	15
CO ₂ , მ ³ /ტ	2200	60-500
NO _x , მ ³ /ტ	2	0,02
ენერჯის ხარჯი, გვ/ტ	20000	4500

მეტალურგიულ წარმოებაში მომუშავე ყველა ეკონომისტი მივიდა იმ დასკვნამდე, რომ 2010 წლისათვის იქნება ლითონური ნედლეულის საერთო ნაკლებობა და ჯართის დეფიციტი. თუ არ მოიძებნა მათი შემცველი მასალები და არ ამოქმედდა ამ უკანასკნელთა საწარმოებელი ახალი სიმძლავრეები, მაგალითად, რკინის პირდაპირი აღდგენის ახალი სიმძლავრეები. ვინაიდან მოთხოვნა ფოლადის მზა ნამზადზე ყოველწლიურად იზრდება 2,5 %-ით, ამიტომ ჯართის დეფიციტი მიმდინარე საუკუნეში გარდაუვალია. შესაძლოა ჯართი რაოდენობრივად საკმარისი იყოს, მაგრამ მისი ღირებულება და, განსაკუთრებით, ხარისხი ვეღარ დააკმაყოფილებს მეტალურგების მოთხოვნებს. იმისათვის, რომ მომავალი ჯართის დეფიციტს წინ აღუდგეთ, უნდა განხორ-

ციელდეს რამდენიმე აუცილებელი პირობა: უახლოეს წლებში აქტიურად შევიდეს ექსპლოატაციაში თუჯისა და ლითონური ჯართის შემცველი მასალების საწარმოო სიმძლავრეები; მნიშვნელოვნად გაიზარდოს მოქმედი ბრძმედებისა და კონვერტერების წარმადობა; სრული მეტალურგიული ციკლის ქარხნებმა უნდა შეინარჩუნონ ეკონომიკური გამართლება ელექტრორკალურ ღუმელებთან ქარხნებთან კონკურენციისას, რადგან პირველები 2010 წლისათვის ნამდვილად დათმობენ მოწინავე პოზიციებს; გაიზარდოს ელექტრორკალურ ღუმელებში შოთისებრი თუჯის გამოყენება.

ამავე დროს, კონვერტერულ წარმოებაში ახალი ტექნოლოგიების დანერგვა (კაზმში მყარი ჯართის წილის გაზრდა) კიდევ უფრო გააღრმავებს ლითონური ჯართის დეფიციტს. ლითონური ჯართის უკმარისობა მომავალში ხელს შეუწყობს შემდეგი ახალი ტექნოლოგიების შექმნას პრობლემების დასაძლევად: ბრძმედში მტვრისებრი ნახშირის სათბობის შებერვა; თუჯის მიღების სხვა საშუალებები; ელექტრორკალური ღუმელები ჭაშვური ჩატვირთვით, ზემძლავრი ტრანსფორმატორებისა და ჟანგბადის უდიდესი რაოდენობის გამოყენებით; თხელი ზოლების უწყვეტი ჩამოსხმა; სლაბების პირდაპირი ჩატვირთვა მახურებელ ღუმელებში; პროდუქციის ზუსტად თავის დროზე მიწოდება და ამ დროის შემცირება; უმცირესი ხანგრძლივობის გლინვის პროგრამა.

თ ა ვ ი VIII

ზემძლავრი ელექტრორკალური ღუმელების თანამედროვე ტიპები და აუცილებელი მოწყობილობა

ღუმელების ტრანსფორმატორების ხვედრითი სიმძლავრე XX საუკუნის 60-იანი წლების შემდეგ 5-ჯერ და მეტად გაიზარდა, რითაც 900–1000 კვა/ტ-ს გადააჭარბა. ამას მოჰყვა დნობის ხანგრძლივობის შემცირება 45–50 წუთამდე. საგრძნობლად შემცირდა ელექტროენერგიის ხვედრითი ხარჯიც (350–360 კვტ.სთ/ტ-მდე). კარგად მომუშავე 100 ტ ტვეადობის ღუმელის წლიური წარმადობაა 900–1200 ათასი ტონა. მაგალითად აშშ-ში 155 ტ ტვეადობის რკალური ღუმელი ერთ-ერთ მცირე ქარხანაში წელიწადში იძლეოდა 950 ათას ტონას. იქ მუშაობდა სულ 969 ადამიანი და წლიურად 2 მლნ. ტონა ნაგლისს აწარმოებდა, ხოლო 1 ტონა ნაგლინ

პროდუქციაზე იხარჯებოდა 133 კაც-საათი. გერმანიაში 70 ტონა ტევადობის ორი ღუმელით და 710 მომუშავეთ წელიწადში აწარმოეს 1,3 მლნ. ტონა არმატურა და გლინულა.

თანამედროვე ზემოქალაქურ ღუმელებში ძირფესვიანად შეიცვალა გამოდნობის ტექნოლოგიაც. დეფოსფორაცია და დესულფურაცია მიმდინარეობს წილის მაღალი ფუძიანობისას. დნობის დანიშნულება ძირითადად დაყვანილია კაშმის გადნობამდე. ლითონის განუხანგვა-დახალასება კი გადატანილია ციციხე-ღუმელებში. კაშმისა და თხევადი ლითონის გახურება ხდება გრძელი რკალით მინიმალური დენისას ტრანსფორმატორის სრული სიმძლავრის გამოყენებით. რკალის ეკრანილება ხდება ქაფისებრი წილებით. კაშმის გადნობისათვის დამატებით გამოიყენება ჟანგბადისა და ბუნებრივი აირის გარკვეული რაოდენობა.

ღუმელიდან გამომავალი აირებით კაშმის წინასწარმა გახურებამ 250–500 °C-მდე შესაძლებელია შეამციროს ელექტროენერგიის ხარჯი 1 ტონა გამოდნობილ ფოლადზე 30–70 კვტ.სთ-ით. კაშმის უწყვეტი ჩატვირთვისას ღუმელის წარმადობა იზრდება 10–15 %-ით, ხოლო ელექტროენერგიის ხარჯი 1 ტონა გამოდნობილ ფოლადზე მცირდება 40–60 კვტ.სთ-ით. ასეთი ღონისძიებებით შესაძლებელია ღუმელის წარმადობის გაზრდა 15–20 %-ით და ელექტროენერგიის ხარჯის შემცირება 60–100 კვტ.სთ/ტ-ით. შექმნილია საწარმოო ჭაშვური ღუმელები ჯართის წინასწარი გახურების მოწყობილობით, რომელშიც ჯართი ხურდება ღუმელიდან გამომავალი ნახშირუხანგით გაჯერებული ცხელი აირებით. ღუმელიდან გამომავალ აირებში ჭარბობს ნახშირუხანგი (განსაკუთრებით, თუ კაშმში გამოიყენება რკინის კარბიდი). ხდება მისი დაუხანგვა ნახშირორუხანგამდე და გამოიყოფა სითბოს დიდი რაოდენობა. ამ გზით შეიძლება შემცირდეს როგორც ელექტროენერგიის ხარჯი 1 ტ გამოდნობილ ფოლადზე 360 კვტ.სთ-მდე, ისე – დნობის ხანგრძლივობაც 5 წუთით. ამ დროს სანთურებით მიწოდებული ენერგია აღწევს 264 კვტ.სთ/ტ-ზე. თუ ბუნებრივი აირის მიწოდება უშუალოდ განხორციელდება გამდნარ ლითონში, ელექტროენერგიის ხარჯი მნიშვნელოვნად შემცირდება.

ზოგიერთ ქარხანაში უფრო შორს წავიდნენ, გამოიყენეს რა ორბაზანიანი ღუმელები ორი ჭაშვით, ერთი საერთო ტრანსფორმატორითა და მოკლე ქსელით. ასეთი ღუმელები ხასიათდებიან მაღალი წარმადობით და ენერგიის მცირე ხვედრითი ხარჯით (360 კვტ.სთ/ტ-მდე, რაშიც შედის ციციხე-ღუმელზე დახარჯული ენერგიაც). 90 ტ ტევადობის ასეთი ღუმელის წარმადობა აღწევს 111 ტ/სთ, ხოლო 1 დნობაზე საშუალოდ იხარჯება 51 წუთი.

სპეციალისტების აზრით, თუ მოხდა ჯართის წინასწარი დამუშავება სპეციალურ დანადგარებზე, მაშინ დნობის ხანგრძლივობა შეიძლება შემცირდეს 40 წუთამდე. სხვა საამქროებში მოქმედი 95 ტ ტევადობის თითოეული ასეთი ორკორპუსიანი ღუმელის წარმადობა აღწევს 50 ათას. ტ/თვეში, ელექტროენერგიის ხარჯი – 348 კვტ.სთ/ტ მზა ნამზადზე (ამაში შედის 20 კვტ.სთ/ტ ელექტროენერგიის ხარჯი ციცხეში ფოლადის დახალასებაზე). სპეციალისტების აზრით, ამ საამქროში ღუმელის კონსტრუქციის კიდევ მეტი დახვეწა წარმადობას გაზრდის 70 ათას ტონამდე თვეში (30 დნობა დღე-ღამეში) და შეამცირებს ელექტროენერგიის ხარჯს 330 კვტ.სთ/ტ-მდე. უნდა აღინიშნოს, რომ თავიდან გადაწყვეტილი იყო ერთი კორპუსიდან გამომავალი ცხელი აირებით გაეხურებინათ მეორე კორპუსში ჩატვირთული ჯართის ნახევარი და ჭაშვში მოთავსებული ჯართიც. მაგრამ ამ ხერხის გამოყენებაზე უარის თქმა მოუხდათ იმის გამო, რომ მეორე ღუმელის კორპუსში ხდებოდა ცხელი აირის განზავება ცივი ჰაერით და ჭაშვში ღუმელის კორპუსიდან დიდი მოცულობის აირების გაწოვა. ამიტომ მეორე ღუმელის კორპუსში ჩაყრილი კაშმის ნახევარი ხურდებოდა ქშინებით.

საფრანგეთში მუშაობს მუდმივი დენის 150 ტ ტევადობის ღუმელი. მის გამახურებელ ჭაშვში გათვალისწინებულია კონსოლები; ისინი არეგულირებენ კაშმის მიწოდებას ღუმელში, რომელიც მუშაობს თხევად თუჯზე. ფირმის ხელმძღვანელობას იმედი აქვს, რომ მიაღწევს 140 ტ/სთ-ში წარმადობას 280 კვტ.სთ/ტ-ზე ელექტროენერგიის ხარჯით, თუ კაშვში 30 % თხევადი თუჯი იქნება გამოყენებული.

ელექტროდების ხარჯის შემცირების მიზნით მუდმივი დენის ზოგიერთ ღუმელში შეყვანილია 45°-ით დახრილი ელექტროდები.

10.8.1. მუდმივი დენის რკალური ფოლადსადნობი ღუმელები

ბოლო წლებში გამძაფრდა კამათი იმის შესახებ, თუ რომელი ფოლადსადნობი რკალური ღუმელია უფრო პერსპექტიული მომავლისათვის: მუდმივი თუ ცვლადი დენის. ორივე მიმართულების მიმდევრებს თავიანთი მოსაზრებები აქვთ.

მუდმივი დენის ღუმელების მომხრეები ამტკიცებენ, რომ მცირდება: 1. ელექტროდების ხარჯი, 2. ელექტროენერგიის ხარჯი და 3. ფლიკერ-ეფექტი (ციმციმის ეფექტი).

ამ მოსაზრებების საწინააღმდეგოდ ცვლადი დენის ღუმელე-

ბის მომხრეები ამტკიცებენ, რომ მართალია მცირდება ელექტროდების ხარჯი, მაგრამ მუდმივი დენის ღუმელს სჭირდება დიდი დიამეტრის ელექტროდები. ასეთი ელექტროდების დამზადება კი რთულია და მათი დამზადების ხარჯები გადაყარავეს ყოვლადის დნობისას ელექტროდების ხარჯის შემცირებით მიღებულ ეკონომიკურ ეფექტს.

მუდმივი დენის ღუმელების მიმდევრებმა შექმნეს მრავალ-ელექტროდიანი (2-დან ჯერჯერობით 6-მდე) ღუმელები. თუმცა საპასუხოდ ცვლადი დენის ღუმელების მომხრეებმა ბოლო ხანს შეძლეს ელექტროდების ხარჯის 2-3-ჯერ შემცირება. ცვლადი დენის ღუმელების მიმდევრებმა მხოლოდ ფლიკერ-ეფექტის საწინააღმდეგოდ ვერ გამოინახეს პასუხი და ალბათ ამის შედეგია, რომ 1991-1995 წლებში გაშვებული 37 ღუმელიდან მხოლოდ 4 იყო ცვლადი დენის, ხოლო 1997 წლამდე გასაშვებად დაგეგმილი 12 ღუმელიდან მხოლოდ 4 უნდა ყოფილიყო ცვლადი დენის (ცხრ. 10.13).

მუდმივი დენის რკალური ღუმელებით დაინტერესება 1982 წლიდან იწყება. მიუხედავად ამისა, 1988 წლამდე მათი მრეწველობაში დანერგვა არ მომხდარა და ყველაზე დიდი ღუმელის ტევადობა იყო 35 ტ. გამონაკლისს მხოლოდ საფრანგეთში გაშვებული მუდმივი დენის სამელექტროდიანი 80 ტ-იანი ღუმელი შეადგენდა. სხვა ღუმელები მრეწველობაში ცვლადი დენის ძველი ღუმელების გადაკეთებით ინერგებოდა.

მუდმივი დენზე მომუშავე დიდი ტევადობის (130 ტ) მძლავრი ღუმელის გაშვებაში პირველობა ეკუთვნის იაპონიას. ღუმელი ტირისტორული გამმართველებით იყო აღჭურვილი და შეეძლო 120 კა დენის მიწოდება რკალზე უქმი სელის 980 ვ ძაბვისას. ელექტროენერგიის ხარჯი იყო 350 კვტ.სთ/ტ-ზე. გამოიყენებოდა ჯართის გახურება, ჟანგბადისა და აირების ქშინებით. წარმადობა იყო 80 ათასი ტ/თვეში. ამის შემდეგ დაჩქარდა მუდმივი დენის რკალური ღუმელების მშენებლობა (ცხრ. 10.14).

მუდმივი დენის ღუმელები სხვადასხვა კონსტრუქციისაა. ისინი ძირითადად განსხვავდებიან კამარის ელექტროდ-კათოდების რაოდენობით და დენის გამტარი კენძების კონსტრუქციებით.

მუდმივი დენის სამელექტროდიანმა ღუმელებმა (მდლ) ვერ პოვეს ფართო გავრცელება. მათი კონსტრუქციები, სამართავი და ძალოვანი მოწყობილობები მეტად რთულია. სინამდვილეში ამ ღუმელების ელექტრომომარაგების სისტემა შედგება სამი დამოუკიდებელი ქსელისაგან. გარდა ამისა, სამელექტროდიანი მდლ ვერ უზრუნველყოფს გამოსხივების ისეთ თანაბარ განაწილებას, როგორც ეს ხდება ერთ ელექტროდიან მდლ-ში. ამჟამად

ელექტრორკალური ფოლადსაღნობი ღუმელების
ექსპლუატაციაში შესვლის მონაცემები

ქვეყანა	ექსპლუატაციაში შეყვანის წელი	ღუმელის სახეობა	ტევადობა, ტ
1	2	3	4
ბელგია	1993	მდ	115
კანადა	1997	ცდ	165
ჩინეთი	1996	მდ	2-150
	1995	მდ	2-100
საფრანგეთი	1994	მდ	150
გერმანია	1994	ცდ	70
	1994	მდ	125
	1995	მდ	100
	1995	მდ	125
ინდოეთი	1993	მდ	3-150
	1996	ცდ	2-180
იაპონია	1991	მდ	110
	1994	მდ	120
	1992	მდ	110
	1993	მდ	100
	1994	მდ	60
	1991	მდ	75
	1994	მდ	2-40
	1995	მდ	2-150
	1992	მდ	150
	1995	მდ	250
	1996	მდ	140
	სამხრეთ კორეა	1995	ცდ
1995		მდ	3-155
1996		მდ	2-200
1997		მდ	2-120
1996		მდ	130
1992		მდ	120
ლუქსემბურგი	1996	მდ	2-130
	1993	ცდ	95
	1994	მდ	165
მაღარიზია	1997	მდ	180
	1995	მდ	80
	1996	მდ	73
	1991	მდ	70
შექსიკა	1995	მდ	135
სამხრეთ აფრიკა	1995	ცდ	100
ტაივანი	1992	მდ	110
	1992	მდ	90

1	2	3	4
თერქეთი	1992	მდ	80
აშშ	1991	მდ	60
	1995	მდ	2-220
	1996	მდ	135
	1994	მდ	100
	1995	მდ	-
	1992	მდ	2-165
	1993	მდ	105
	1994	მდ	150
	1994	მდ	65
	1996	ცდ	165

მდ - მუდმივი დენის

ცდ - ცვლადი დენი

მუდმივი დენის მოქმედი ღუმელის ზოგიერთი
საექსპლუატაციო მახასიათებელი

მაჩვენებელი	ქვეყნები							
	საფრან- გეთი	იაპონია				მალაი- ზია	აშშ	
დნობის წონა, ტ	80	120	80	100	130	80	60	150
ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, მგვტ.	83	100	68	100	100	70	44	80
დნობის საშუალო ხანგრძლივობა, წთ.	65	65	63	57	58	60	52	63
დნობების რაოდენობა დღეღამეში, ცალი	22/24	22/24	22/24	24	24/26	24	24/30	22
ელექტროდების ხვედ- რითი ხარჯი, კგ/ტ	1.2	1.1	1.3	1.1	1.1	1.5	1.2	1.2
ელენერჯის ხვედრი- თი ხარჯი, კვტ.სთ/ტ	400	360	390	280	350	380	414	442
ქვედის ელექტრო- დების სახეობა	ღეროიანი		ლითონური					
გაცივების სერხი	წყალი				ჰაერი			
ქვედის ელექტროდე- ბის მედეგობა, დნობე- ბის რაოდენობა (კალობით)	1300	1300	1300	1100	1800	1500	1100	2000

სამელექტროდიანი მდლ-ის უპირატესობა ერთელექტროდიანთან შედარებით ვერაფერში მუდმივდება, თუმცა პირველთა გამოყენების აუცილებლობა შესაძლებელია დადგეს დიდი ტევადობის (200 ტ და მეტი) ღუმელების გაშვებისას.

ყველაზე დიდ სიძნელეებს (განსაკუთრებით დიდი ტვეადობის ღუმელებისათვის) ქმნის ქვედის ელექტროგაყვანილობის მედეგობა. დღეისათვის შეიძლება ჩაითვალოს, რომ ეს პრობლემა ძირითადად გადაწყვეტილია, თუმცა ამ მიმართულებით კვლევები კიდევ ინტენსიურად მიმდინარეობს. მდღ-ის ქვედის ელექტროგაყვანილობის რამდენიმე კონსტრუქცია არსებობს. პირობითად მას ყოფენ ოთხ ნაწილად: 1. დენგამტარი ქვედი, რომელიც შესრულებულია ნახშირბადის შემცველი კერამიკული მასალებით (ცივდება პაერთ); 2. ქვედის მრავალღეროიანი ლითონური ელექტროდი (ცივდება პაერთ); 3. მრავალფირფიტოვანი ლითონური ელექტროდი (ცივდება პაერთ); 4. ქვედის ერთღეროიანი (შეიძლება რამდენიმეც) ლითონური ელექტროდი (ცივდება წყლით).

ყველა ეს კონსტრუქცია სიცოცხლისუნარიანია (საშუალო მედეგობა 1000 დნობაა) და გამოიყენება სხვადასხვა ფორმების მიერ.

ძირითადი განსხვავება მდღ-სა და ცდღ-ს შორის შეიძლება გამოიხატოს შემდეგში: 1. მუდმივი დენის რკალი უფრო მდგრადია, განსაკუთრებით დნობის პირველ ნახევარში. ამის გამო ნაკლებია აირების გაცვლა ატმოსფეროსა და ღუმელს შორის, თუმცა მას მიყვავართ დაჟანგვითი პროცესების შენელებისაკენ. 2. მდღ-ში ერთი ელექტროდით მიწოდებული ენერგია ტოლია ანდა მეტიცაა ცდღ-ში სამი ელექტროდით მიწოდებულ ენერგიაზე. თანაც ეს მიწოდებული ენერგია ღუმელის ღერძის მიმართულებისაა და გამოყოფილი სითბო თანაბრად ნაწილდება კედლებზე, უფრო უკეთესი პირობები იქმნება კაზმის დნობისათვის, შესაძლებელია უფრო დიდი ხვედრითი სიმძლავრის შეყვანა, რასაც ბუნებრივად მიყვავართ წარმადობის გაზრდისაკენ ცდღ-სთან შედარებით. თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ რკალის ღერძულ განლაგებას მდღ-ში მოსდევს სითბოს არათანაბარი განაწილება თხევადი ლითონის სიღრმეში და აბაზანის გასწვრივ. 3. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ არ ხდება რკალის პოლარობის ცვლა. ამის გამო მკვეთრად მცირდება კაზმში შემავალი ელემენტებისა და თავად რკინის ამოწვაც. ამიტომაც მცირდება მტვრის წარმოქმნა. ცდღ-ში კი პოლარობის შეცვლის შემდეგ როცა კაზმი ხდება კათოდი, მიმდინარეობს ჯართში შემავალი ელემენტების ამოწვა და მტვრის წარმოქმნა. 4. მდღ-ის გამტარი ქვედის გამო საჭიროა დნობის დაწყებისას შეიქმნას კარგი კონტაქტი კაზმსა და ანოდს შორის.

ჩამოთვლილი განსხვავებები მდღ-სა და ცდღ-ს შორის არ მოითხოვენ რაიმე პრინციპულ გარდაქმნების დნობის ტექნოლოგიაში. საერთოდ, ფოლადის დნობის ტექნოლოგიურ შესაძლებლო-

ბებში, დნობის ინტენსიფიკაციის ხერხებში და პირველადი ენერგიაშემცველების გამოყენებაში მდდ არავითარ შეზღუდვებს არ საჭიროებს. ეს განსხვავებები გამოწვეულია მუდმივი დენის განსაკუთრებული ბუნებით და მდდ-ს მუშაობისას საშუალებას იძლევა უზრუნველყოს თავისი უპირატესობა ცდლ-ის მიმართ შემდეგში: 1. ტექნოლოგიისა და ტექნიკის სფეროში: გაკიდებით ექვიტურად ჩატარდეს გადნობის პროცესი და უფრო სრულყოფასთან იქნეს გამოყენებული რკალის სასარგებლო სიმძლავრე; კამარის ელექტროდზე 30 %-ით გაიზარდოს დენის დასაშვები სიმძლავრე; შეიქმნას კონდუქციური ელექტრომაგნიტით ლითონის რეგულარული არევისა და აბაზანაში გამავალ სამუშაო დონესა და რკალზე გარემამაგნიტური ველის შემოქმედებით რკალის დერძული სტაბილიზაციის შესაძლებლობა. 2. ეკონომიკის სფეროში შემცირდეს: გრაფიტის ელექტროდების ხვედრითი ხარჯი – 50-60 %-ით; ელექტროენერჯიის ხვედრითი ხარჯი – 5 %-ით; ცეცხლგამძლე მასალების ხარჯი – 10 %-ით. 3. სამუშაო პირობების გაუმჯობესების სფეროში: მოხდეს ლითონის გახურების რეჟიმის მართვის საიმედო ავტომატიზაციის უზრუნველყოფა ცდლ-სთან შედარებით; შემცირდეს შრომის ხარჯები (130 ტ ტევადობის მდდ ღუმელზე მუშაობს 2 ადამიანი); გამარტივდეს ელექტროდის დაგრძელებისა და გამოცვლის ოპერაციები; უფრო მოხერხებული გახდეს ღუმელის კონსტრუქციების ელემენტების მომსახურება და განლაგება; გამარტივდეს კამარის შეკეთება, რადგან იგი მთლიანად წყლით შეიძლება გაცივდეს; ელექტროძალოვანი მოწყობილობები განლაგდეს საამქროს გარეთ და ამით სადნობი და საჩამოსხმო უბნები განთავისუფლდეს მაღალი ძაბვის დანადგარებისაგან. 4. ეკოლოგიის სფეროში: საგრძნობლად შემცირდეს მტერის წარმოქმნა რკალის პერიოდულობის შეუცვლელობის გამო; ხმაურის დონე შემცირდეს 15 დბ-ით; ფლიკრ-ეფექტი (ციმციმის ეფექტი) შემცირდეს 50 %-ით.

ხარჯების შემცირება ეკონომიკურ სფეროში (მოყვანილია სამი მონაცემის მიხედვით, ქველის ელექტროდების ხარჯის გამოკლებით), უზრუნველყოფს ეკონომიას არანაკლებ 5 აშშ დოლ/ტ-ზე. მდდ-ის მშენებლობისას დამატებითი კაპიტალური ხარჯები ცდლ-სთან შედარებით 30–50 %-ით მეტია. მაგრამ ეს ხარჯები 0,5–1,0 წელიწადში იფარება. დამატებითი ეკონომია შეიძლება გამოვიდეს: მალეგორებლებისა და კაზმის ამოწვის შემცირების ხარჯზე; ტექნოლოგიის სტაბილურობისა და ლითონის ხარისხის გაუმჯობესებით (მდდ-ს უკეთესი მართვის შედეგად); მუდმივი დენის წყაროების თვითღირებულების შემცირებით და მათი შემდგომი გაუმჯობესე-

ბით; მდღ-ს წარმადობის გაზრდით ცდღ-სთან შედარებით, მასში შეყვანილი ხვედრითი სასარგებლო სიმძლავრის მომატებით.

მდღ-ს მოყვანილი უპირატესობები ამჟამად ნაწილობრივ განხორციელებულია, ნაწილი კი კვლევის შედეგების შემდეგ განხორციელება.

მდღ-სა და ცდღ-ს მუშაობის შესახებ მოყვანილი შედარებები ცალსახად ადასტურებს მდღ-ს უპირატესობას. მაგრამ ეს არ ნიშნავს იმას, რომ სამუშაოები ცდღ-ის მუშაობის გასაუმჯობესებლად აღარ ტარდება. მოიპოვება მონაცემები, რომ ეკონომიკური მაჩვენებლებით ცდღ თითქმის მიუახლოვდა მდღ-ს. როგორც ამ დარგში მომუშავე სპეციალისტები აღნიშნავენ, მუშაობის ეკონომიკური მაჩვენებლებით ცდღ მხოლოდ მიუახლოვდნენ მდღ-ს, რომლის მუშაობის გაუმჯობესებისათვის ჯერ კიდევ მრავალი შესაძლებლობა არსებობს.

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მდღ-ს განვითარების გაცილებით უკეთესი პერსპექტივა აქვს. მუშაობის სრულყოფის მიზნით ჩატარებული კვალიფიციური სამუშაოების მიუხედავად მუშაობის მაჩვენებლებით ცდღ მაინც ვერ უტოლდებიან მდღ-ს. მათ შორის კონკურენცია ხელს უწყობს ორივე მიმართულების პროგრესს, თუმცა, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, მდღ-ს უფრო მეტი პოტენციური შესაძლებლობები აქვს. ამჟამად 130 ტ ტევადობის მდღ-ს დაყენებას არავითარი წინააღმდეგობა არ გააჩნია. ცდღ-ს შეცვლა მდღ-ით დიდად აუმიჯობებს ეკოლოგიურ გარემოს.

მდღ-ის შემდგომი განვითარების ამჟამინდელ პრობლემას წარმოადგენს მათი ტევადობის გაზრდა 200–250 ტ-მდე წარმადობის პროპორციულ ზრდასთან ერთად. ამის მიზეზია ისეთი მახურებლუბის (ელექტროდების) არარსებობა, რომლებიც შეიძლებდნენ გაცილებით მეტი დენის დატვირთვის გაძლებას. ამჟამად არსებული ელექტროდების დიამეტრის (600–700 მმ) გაზრდა ვერ ხერხდება მათი დამზადების ტექნოლოგიის შეზღუდული შესაძლებლობების გამო. მაგრამ მდღ-ს წარმადობის გაზრდა ტევადობის ზრდასთან ერთად შესაძლებელია არა მარტო რკალის დენის ზრდით, არამედ ღუმელის სადნობი მოცულობის პარამეტრების ცვლით (მაგ. აბაზანის რადიუსის მის სიღრმესთან შეფარდების შემცირებით), დნობის ტექნოლოგიის სრულყოფით (რკალზე ძაბვის მომატებით, კონდუქციური ელექტრომაგნიტური ამრევეების გამოყენებით), ალტერნატიული ენერჯიაშემცველების გამოყენებით.

10.8.2. ორკორპუსიანი ჭაშვური რკალური ღუმელები

ორკორპუსიანი რკალური ღუმელები საერთო ელექტროტექნიკური მოწყობილობებით შესაძლებლობას იძლევა საგრძნობლად გაეზარდოს ღუმელის წარმადობა. ასეთი ორკორპუსიანი რკალური ღუმელები შეიძლება იყოს როგორც ცვლადი, ასევე მუდმივი დენის. იაპონურმა ფირმამ „ნიჰონ სტილ“ ექსპლუატაციაში შეიყვანა მუდმივი დენის ასეთი რკალური ღუმელი. ერთი კორპუსი გამოიყენება კაზმის დნობისათვის, მეორე კი — კაზმის გასახურებლად (პირველიდან გამომავალი აირების საშუალებით). გამომავალი აირების სითბოს კაზმის გასახურებლად რაც შეიძლება სრული გამოყენებისათვის მინიმუმამდეა შემცირებული მანძილი კორპუსებს შორის, მაგრამ არც იმდენად, რომ ხელი შეეშალოს ღუმელის ტექნიკურ და ტექნოლოგიურ მომსახურებას. ორკორპუსიანი ღუმელი უზრუნველყოფს ენერჯის ხარჯის შემცირებას 1 ტ გამოდნობილ ფოლადზე და საგრძნობლად აუმჯობესებს ეკოლოგიურ მდგომარეობას. ასეთი ღუმელების გამოყენებისას შესაძლებელია გაიზარდოს წარმადობა არსებული სიმძლავრის ტრანსფორმატორით, ანდა შენარჩუნებული იქნეს იგივე წარმადობა ნაკლები სიმძლავრის ტრანსფორმატორით.

იაპონიის ერთ-ერთ ფირმაში ორკორპუსიანი ღუმელების გამოყენებით წარმადობა გაიზარდა 22 %-ით, დნობის ხანგრძლივობა შემცირდა 43 %-ით ჩვეულებრივ ღუმელთან შედარებით. ასეთი ღუმელების მუშაობისას კაზმის წინასწარი გახურების ხანგრძლივობა 25 წუთია, ელექტროენერჯის ხარჯი მცირდება 40–50 კვტ.სთ/ტ-ით. ამასთან, კაპიტალური ხარჯები ასეთივე ტევადობის ჩვეულებრივ ღუმელთან შედარებით, იზრდება მხოლოდ 5 %-ით, რადგან ღუმელის ორივე კორპუსს ყველა დამხმარე მომსახურე მოწყობილობა საერთო აქვს. ქვედის ელექტროდების (დეროიანი, წყლით საცივებელი) მომსახურების და მუშაობის პირობების გაუმჯობესებით მათი მედეგობა გაიზარდა საშუალოდ 2500 დნობამდე.

მუდმივი დენის რკალურ ღუმელში რკალი გადაიხრება იმ ელექტრომაგნიტური ველების გამო, რომლებიც წარმოიქმნება ზედა და ქვედა ელექტროდებამდე დენის მიმყვან ქსელში. რკალის გადახრა განსაკუთრებით შესამჩნევია მაშინ, როცა ქვედის ელექტროდად დენგამტარი ქვედი გამოიყენება. რკალის გადახრა მეტად არასასურველი მოვლენაა. იგი იწვევს ცეცხლგამძლე მასალებისა და გამაცივებელი პანელების ლოკალურ დაზიანებას, კაზმის არათანაბარ გახურებასა და ცივი უბნების წარმოქმნას.

კარგი შედეგი მისცა ხსენებულ ფირმას ქვედიდან ლითონის არევაში. ეს ღონისძიება საშუალებას იძლევა 50 %-ით გაიზარდოს აბაზანის სიღრმე ჩვეულებრივ რკალურ ღუმელებთან შედარებით. აბაზანის სიღრმის შეფარდება მის დიამეტრთან შეიძლება 0,3-მდე გაიზარდოს (ჩვეულებრივ ღუმელებში იგი 0,2-ის ტოლია). ქვედიდან ლითონის არევისას აირის ხარჯმა ერთ-ერთ ღუმელზე შეადგინა 200 ლ/წთ, რამაც, თავის მხრივ, გამოიწვია ენერჯის ხარჯის შემცირება 15 კვტ.სთ/ტ-ზე.

ერთ-ერთ ფირმაში ამოქმედებული იქნა მუდმივი დენის ორკორპუსიანი ღუმელი კორპუსებში კაზმის რიგრიგობით გახურებით. ღუმელის კორპუსები ელექტროენერჯიას იღებენ საერთო ქვესადგურიდან. ასეთი ღუმელის მახასიათებლები და მტკერის დაჭერის სისტემის მაჩვენებლები შემდეგია:

ღუმელის ტიპი	მუდმივი დენის ფოლადსადნობი ღუმელი ორი კორპუსით
ღუმელის ტევადობა და მოცულობა გარსაცმის დიამეტრი, მმ	120/152
ზედა ელექტროდის დიამეტრი, მმ	7000
ქვედის ელექტროდები:	710
ღეროების რიცხვი	3
ღეროს დიამეტრი, მმ	280
ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, მგვა	85
დამხმარე ჰაერის შემბერის წარმადობა, მ ³ /წთ	6000

პირველი ღუმელის კორპუსიდან ლითონის გამოშვების შემდეგ (10 წთ) უკვე შესაძლებელია მეორე ღუმელის ჩართვა. ამის გამო წარმადობა იზრდება 25 %-ით. ერთკორპუსიან ღუმელთან შედარებით. კაზმის გახურების ეფექტურობა ძლიერ არის დამოკიდებული ამ ოპერაციის ხანგრძლივობაზე. როდესაც კაზმის პირველი ულუფის წილია 56 % და გახურების ხანგრძლივობა – 25 წთ. ხვედრითი ენერჯის ეკონომიაა 35 კვტ.სთ/ტ. ასეთი ღუმელის თბური ბალანსია:

სითბოს შემოსავალი, მგვ/ტ	სითბოს გასავალი, მგვ/ტ
ელექტროენერჯია	1310 ფოლადის თბოშემცველობა
კაზმის თბოშემცველობა	1410
სათბობის წვის სითბო	101 წილის თბოშემცველობა
დაჯანგვის და სხვა ენერჯია	159
	92 წყლით გატანილი სითბო
	113
	821 გამომავალი აირებით
	გატანილი სითბო
	406
	სხვა დანაკარგები
	235
სულ	2324 სულ
	2324

ამრიგად, ასეთი ტიპის ღუმელისათვის კაზმის გასახურებლად გამოიყენება გამომავალი აირების სითბოს 25 %.

ფირმამ „სამ მონტერო“ გადაწყვიტა დაეხურა კონვერტერული საამქრო და განაახლა ელექტროფოლადსადნობი საამქრო. უკანასკნელის წარმადობა უნდოდათ გაეზარდათ 510-დან 750 ათას ტონა ნამზადამდე წელიწადში. ამისათვის გადაწყვეტილი იყო დაეყენებინათ 90 ტ ტევადობის ორკორპუსიანი ელექტრორკალური ღუმელი (უკვე არსებული საამქროს სიმძლავრის გათვალისწინებით). ეკოლოგიურ საკითხებზე გამოყოფილი იყო საერთო კაპიტალდაბანდების 12,5 %. განახლების შემდეგ მიღწეული იყო შემდეგი საწარმოო მაჩვენებლები: 33 დნობა/დღე-ღამეში და წარმადობა 125 ტ/სთ.

90 ტ ტევადობის ორკორპუსიანი ღუმელი ჭაშეური ჩატვირთვით იკვებება 96 მგვა სიმძლავრის ცველადი დენის ტრანსფორმატორით, რომლის მაქსიმალური მეორადი ძაბვაა 900 ვ. ღუმელს აქვს 3 მგვტ სიმძლავრის 12 სანთურა (6-6 თითოეულ კორპუსზე). ღუმელის გარსაცმი (დიამეტრი 6,3 მ) მცირედ ოვალურია და აღჭურვილია ჟანგბად-მაზუთის 6 სანთურით. 4 მათგანი განთავსებულია ჭაშეში, 1 – სამუშაო ფანჯრის საფარში და 1 – გამოსაშვები ხვრელის ახლოს. აზოტის შესაბერად ქვედში ჩაყენებულია ფორიანი 5 საცობი. თითოეული საცობის გამტარუნარიანობაა 4 მ³/სთ. ჟანგბადის ხარჯი იცვლება 2000-3200 მ³/სთ ზღვრებში. ენერჯის მიწოდებისას დნობის ხანგრძლივობაა 32-34 წთ, ელექტროდების საშუალო ხარჯი – 1,6 კვტ, ელექტროენერჯის საშუალო ხარჯი – 3 მგვტ.სთ/ტ (სარეკორდო – 288 კვტ.სთ/ტ).

10.8.3. ჭაშეური რკალური ღუმელები

ამჟამად სულ უფრო მეტად ცდილობენ გამოიყენონ რკალური ღუმელებიდან გამოყოფილი აირების სითბო. მაგრამ ღუმელის გარეთ კაზმის გახურებას უშუალოდ ჩასატვირთ კალათაში რიგი არსებითი ნაკლოვანებები აქვს: 1. სითბოს დიდი ნაწილი იკარგება ნახშირჟანგის დაწვის კამერებში, სადენ მილებში და შემდეგ – ჩასატვირთ კალათამდე გზაში; 2. კაზმის ინტენსიური გახურება შეუძლებელია მისი შედნობის და ჩასატვირთი კალათის დაზიანების გარეშე; 3. თანამედროვე რკალური ღუმელების მაღალი წარმადობის გამო, დრო კაზმის გახურებისათვის ჩასატვირთ კალათებში საკმარისი არ არის; 4. გამომავალი აირების აირსადენები სწრაფად ივსება მტვრით. 5. წარმოიქმნება მრავალი სირთულე გარემოს დაცვის თვალსაზრისით, ჩასატვირთი კალათის ღუმელამდე მიტანისას.

მიუხედავად ამ ნაკლოვანებებისა, ამგვარი ხერხი მაინც გამოიყენება ფოლადსადნობ წარმოებაში და იმ საამქროებში, რომლებშიც ხდება ღუმელიდან გამომავლი აირების სითბოს გამოყენება კაზმის გახურებისათვის ღუმელის გარეთ. ენერჯის ეკონომია ამ ხერხისას აღწევს 20–30 კვტ.სთ/ტ. გახურების ასეთი ხერხის ნაკლოვანებებმა, აგრეთვე ენერჯიაზე ფასების მატებამ და გარემოს გაბინძურებაზე წაყენებულმა მკაცრმა მოთხოვნებმა უბიძგეს მკვლევრებს დამუშავებინათ ღუმელის კონსტრუქციები ჭაშვით, სადაც კაზმის წინასწარი გახურება ხორციელდება გამომავალი აირების სითბოს ხარჯზე უშუალოდ ღუმელში.

ასეთი ღუმელების კამარა უშუალოდაა მიერთებული ჭაშვთან. ღუმელის კორპუსის მიმართ კამარისა და ჭაშვის გადაადგილების მექანიკური სისტემა საშუალებას იძლევა კაზმის ჩატვირთვა მოხდეს ჭაშვიდან ანდა უშუალოდ ღუმელში. ღუმელის ასეთი კონსტრუქცია საშუალებას იძლევა ნებისმიერი ხარისხის კაზმი ჩატვირთოს რამდენიმე წუთში. ჭაშვის დიდი განივკვეთის გამო გამომავალი აირების ნაკადი შენელებულია და ამიტომ იზრდება სითბოს გადაცემა კაზმზე. ღუმელიდან გამომავალი აირების სითბოს საშუალებით კაზმის გახურება შესაძლებლობას იძლევა შემცირდეს ელექტროენერჯის ხარჯი: 1. ჩვეულებრივ რკალურ ღუმელებში კაზმის გახურების გარეშე საჭირო საერთო ხვედრითი ენერჯიაა 700 კვტ.სთ/ტ-ზე. ჩვეულებრივი კონსტრუქციის თანამედროვე სემპლავრ ღუმელებში ენერჯის ხარჯი მცირდება 630 კვტ.სთ/ტ-მდე 2. კაზმის წინასწარი გახურების მაჩვენებლის მიხედვით საერთო ენერჯის ხარჯი შეიძლება კიდევ შემცირდეს 50–100 კვტ.სთ/ტ-ით. პირველი ჭაშვიური ღუმელების გამოყენებისას შესაძლებელი იყო კაზმის მხოლოდ 60%-ის გახურება. მაგრამ ახალი, ერთკორპუსიანი ჭაშვიური ღუმელების გამოყენებისას, წყლით საცივებელი მოწყობილობით კაზმის დაყოვნებისას, შესაძლებელია მთელი კაზმის გახურება 750 °C-მდე.

ჭაშვიური ჩატვირთვა შესაძლებელია ორკორპუსიან ღუმელებშიც. ასეთ ახალ ღუმელებში ხვედრითი ენერჯის ეკონომია აღწევს 110 კვტ.სთ/ტ-ზე.

ორკორპუსიანი ღუმელების კორპუსები მოთავსებულია ერთმანეთთან ახლოს სარკისებრი განლაგებით. თითოეულ კორპუსს აქვს თავისი ჭაში, რომელშიც კაზმის 60% თავსდება. ღუმელის კორპუსები მუშაობენ რიგრიგობით, გამოიყენებენ ერთ ტრანსფორმატორს და აქვთ ელექტროდების საერთო დამჭერები. ამიტომ იქმნება საშუალება შემცირდეს დნობის ხანგრძლივობა და გაიზარდოს ასეთი ღუმელის წარმადობა.

ზემპლავრ ღუმელებში დნობა, ჩვეულებრივ, არათანაბრად მიმდინარეობს. ელექტროენერჯისა და სათბობის წვის სითბოს

ერთდროული გამოყენება გაცილებით უფრო უკეთესი ტექნიკური გადაწყვეტილებაა დნობის თანაბარი მიმდინარეობისათვის. ამის გამო არ ხდება აბაზანის გადახურება და იზოგება ელექტროენერგია. დამატებითი სითბო ღუმელში შემოდის თხევადი ან აიროვანი სათბობის წვით (სანთურები განლაგებულია ჭაშვის ქვედა ნაწილში) და ნახშირბადის დაუანგვით, რომლის შეფრქვევა ხდება წყლით საცივებელი საქშენებით. ნახშირბადის შემცველი მასალების (თხევადი ან მყარი თუჯი) გამოყენება მიზანშეწონილია მაშინ, როცა ნახშირბადი მთლიანად დაიწვება ნახშირორჟანგამდე და გამოყოფილი სითბო მთლიანად გადაეცემა კაზმს. ნახშირბადის მთლიანად ნახშირორჟანგამდე დაწვეა ღუმელში შეუძლებელია (მაღალი ტემპერატურის გამო). შედარებით დაბალი ტემპერატურა ჭაშვში შესაძლებელს ხდის ნახშირბადის ქვეანგის მთლიანად დაწვას. 1 კგ ნახშირის წვისას გამოიყოფა 9,2 კვტ.სთ. ამასთან, ეს ენერგია თითქმის მთლიანად კაზმს გადაეცემა.

ეკოლოგიურად ჭაშვური ღუმელები უფრო კარგია, ვიდრე ჩვეულებრივი ზემძლავრი ღუმელები. ეს გამოწვეულია არა მარტო იმით, რომ ნაკლებია ენერგიის ხარჯი, არამედ იმითაც, რომ კაზმი ჭაშვში ასრულებს პირველადი ფილტრის როლს, სადაც ხდება ღუმელიდან გამომავალი აირების გაწმენდა უხეში მტერისაგან: ჩვეულებრივი ზემძლავრი ღუმელებიდან აირებს გააქეთ 18–22 კგ მტვერი 1 ტ ფოლადზე, ჭაშვური ღუმელებიდან კი 15–16 კგ. ეს მაშინ, როცა ჯართის მხოლოდ 50–60 % ხურდება. ნახშირორჟანგის შემცველობა გამომავალ აირებში არ აღემატება 0,1 %-ს. გარდა ამისა, ჭაშვი მოქმედებს როგორც გამომავალი აირების გამაცივებელი მოწყობილობა. ამიტომ 2-ჯერ მცირდება იმ გამაცივებელი აირის ხარჯი, რომელიც საჭიროა გამომავალი აირების მშრალ ფილტრებამდე მისატანად.

ფოლადის დნობისას საერთო ენერგეტიკული ხარჯების შემცირება და ელექტროენერგიის ნაწილობრივი შეცვლა ბუნებრივი სათბობით, საშუალებას იძლევა 30 %-ით შემცირდეს ტრანსფორმატორის სიმძლავრე იმავე წარმადობის ჩვეულებრივ ზემძლავრ ღუმელთან შედარებით წარმადობის დაუკარგავად, უფრო მეტად შეიძლება ტრანსფორმატორის სიმძლავრის შემცირება თხევადი თუჯის გამოყენებით.

დენის მიმყვან ქსელში წარმოქმნილი ნებისმიერი დაბრკოლება (ფლიკერ-ეფექტი, ძაბვის ვარდნა, რეაქტიული ენერგია) ქსელის სიმძლავრის ვარდნისას მცირდება პირდაპირპროპორციულზე უფრო მეტად. თუ აუცილებელია ქსელში დაბრკოლებების შემცირება, ამ შემთხვევაში ახალ ღუმელზე საჭიროა უფრო ნაკლები

კაპიტალური ხარჯები საკომპენსაციო მოწყობილობებზე. ეს ეხება, როგორც ცველადი, ასევე მუდმივი დენის ღუმელებს.

ერთკორპუსიანი ჭაშვური ღუმელის გამოყენებისას, კაზმის წინასწარი გახურების გარდა არ ხდება თხევად ლითონში უშუალოდ ცივი, ზეთიანი ლითონის მოხვედრა, რადგან ღუმელის კამარა არ იხდება. კაზმის ასეთი ჩატვირთვისას საგრძნობლად კლებულობს ალი და მტერის გამოყოფა.

ჭაშვური ღუმელების მშენებლობისათვის საჭიროა მეტი კაპიტალური ხარჯები. მაგრამ ეს ხარჯები ანაზღაურდება შემდეგი ხარჯების შემცირების გამო: ღუმელზე დენის მიმყვან მოწყობილობებსა და საკომპენსაციო დანადგარებს; გამომაველი აირების გასუფთავებასა და წყლით საცივებელ აირგაყვანილობაზე ენერჯის დანახარჯები მცირდება 50–100 კვტ.სთ/ტ-ით. ამის გამო მცირდება ელექტროდების ხარჯი 0,15–0,30 კვტ-მდე, მეტია ვარგისი ფოლადის გამოსავალი, წარმოიქმნება უფრო ნაკლები მტვერი. საერთოდ, ჭაშვურ ღუმელებზე დამატებითი კაპიტალური დანახარჯები არ იქნება საჭირო, თუ ძირითადი ხარჯები დაკავშირებულია ელექტროენერჯის გამოყენებასთან და წაყენებულია მკაცრი მოთხოვნები ქსელში დაბრკოლებების წარმოქმნის მიმართ. ამრიგად, ჭაშვური ღუმელების მშენებლობაზე გაწეული კაპიტალური დანახარჯები უახლოვდება ჩვეულებრივი ღუმელების კაპიტალურ ხარჯებს.

ჭაშვში ჩაყრილი კაზმის ზომები უნდა შეესაბამებოდეს ჭაშვის განივკვეთს (2,4–6 მ). ევროპული სტანდარტებით კაზმის ზომა არ უნდა აღემატებოდეს 1,5 მ-ს და წონა უნდა იყოს 400 კგ-მდე. ჩვეულებრივად გასუფთავებულ დანაჭროვანებულ ჯართზე მოდის 70 %, შოთისებრზე – 25 %. ცხლადდაბრიკეტებული რკინის წილი შეიძლება იყოს 60 %-მდე, ხოლო თხევადი თუჯის – 30 %-მდე.

კაზმის წინასწარი გახურებისას ეკონომიის მაჩვენებელი ძირითადად დამოკიდებულია ჭაშვიდან მიწოდებული კაზმის რაოდენობაზე, მისი ჩატვირთვის სისწრაფეზე, ღუმელის წარმადობასა და იმ ენერჯიაზე, რომელიც გამოიყოფა ბუნებრივი აირის დაწვისას. ივარაუდება, რომ კაზმის წინასწარი გახურების შედეგად უფრო მეტი ელექტროენერჯია დაიზოგება ერთკორპუსიან ჭაშვურ ღუმელზე, რომელზეც დაყენებულია კაზმის წყლით საცივებელი მოწყობილობა (ასეთია უახლესი ტიპის ღუმელები). სავარაუდოა, რომ კაზმის წინასწარი გახურებისას ელექტროენერჯია უფრო დაიზოგება ისეთ ჭაშვურ ღუმელში, რომელსაც აქვს წყლით საცივებელი გარსაცმი.

ფირმამ „არბედ შიფლანე“ 1993 წელს დაიწყო ჭაშვური ღუმელის ექსპლუატაციაში შეყვანა. მიღწეულ იყო შემდეგი მაჩვენებლები: ელექტროენერჯის ხარჯი – 329 კვტ.სთ/ტ-ზე,

ჟანგბადის – 24,2 მ³/ტ-ზე, აიროვანი საწვავის – 6,5 მ³/ტ-ზე, ელექტროდების ხარჯი 1,35 კგ/ტ-ზე. ღუმელი ძაბვის ქვეშ იმყოფებოდა 39,2 წუთის განმავლობაში და ყოველდღე უშვებდა 30 დნობას, რაც უზრუნველყოფდა 930000 ტ წარმადობას წელიწადში. ღუმელი დააყენეს 10 თვეში მთელი სადნობი მოწყობილობების შეცვლით. ფირმას გადაწყვეტილი ჰქონდა 1995 წლისათვის გაიჩერებინა ჟანგბად-კონვერტერული საამქრო.

ინგლისის ფირმამ „შირნეს სტილ“ განაახლა ელექტროფორულად სადნობი საამქრო ენერჯის ეკონომიის მიზნით და გარემოს დაცვის მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად ერთ-ერთი ღუმელი გადაკეთდა ჭაშეურ რკალურ ღუმელად. ოდნავ ოვეალურ ღუმელს (დიამეტრით 6,1 მ) დასაშლელი კორპუსი აქვს, ამასთან, ზედა ნაწილი მთლიანად წყლით ცივდება, ხოლო ქვედი ამოგებულა ცეცხლგამძლე მასალით. ღუმელს გააჩნია შესაძლებლობა დაიხაროს სამუშაო ფანჯრისკენ 8 °-ით წიდის მოსახდელად და 12 °-ით ფოლადის გასაშვებად. ქვედიდან ლითონის გამოშვებით ხერხდება დამუხრეველი წიდის მოკვეთა თხევადი ფოლადისაგან. ეს გარემოება აუმჯობესებს მალეგირებლების ათვისებას და უზრუნველყოფს ლითონის უფრო მეტ სისუფთავეს.

ღუმელი აღჭურვილია ჟანგბად-აირის 6 საქშენით, რომლებიც ისეა განლაგებული, რომ ჯართი დამატებით გახურდეს წინასწარ და გადნეს. კამარა და ჭაშვი უძრავად არის დამაგრებული, აქვს მილისებრი ფორმა და ცივდება წყლით. ჭაშვი 5,5 მ მოცულობისაა და მასში კაზმის 40 % თავსდება. ჭაშვს კეტავენ დახრილი მოსრიალე კარით, რომელიც იღება მეორე და მესამე ჩასატვირთი კალათის ხმარებისას. ღუმელი აღჭურვილია 80 მგვ.ა სიმძლავრის ტრანსფორმატორით და მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრე საშუალოდ აღწევს 55 მგვ.ა-ს. გამომავალი ცხელი აირების და ქაფისებრი წიდის მისაღებად გამოიყენება ჟანგბადისა და ნახშირის ფხენილის ერთობლივი შებერვა. ჟანგბადი მიეწოდება ზებგერითი სიჩქარით (4000 მ³/სთ) და წნევით 12 მგპა, ხოლო ნახშირბადის ფხენილი – სხვა საქშენით. ნახშირის ფხენილი წარიტაცება ჟანგბადის ნაკადით, რის შედეგადაც წარმოიქმნება ნახშირჟანგი, რაც წარმოქმნის ქაფისებრ წიდას. ნახშირორჟანგამდე ნახშირჟანგის დაჟანგვისას გამოიყოფა დიდი რაოდენობის სითბო, რომელსაც იყენებენ ჯართის წინასწარი გახურებისათვის, რაც წარმოადგენს ჭაშეური რკალური ღუმელების უპირატესობის ძირითად მიზეზს. ფოლადის დნობისას ჩვეულებრივი ღუმელიდან გამომავალი აირის ტემპერატურა აღწევს 1200–1500 °C-ს, ხოლო ჭაშეური ღუმელიდან გამომავლისა კი – 250–500 °C-ს (ცხრ. 10.15, 10.16, 10.17).

ფორმა „შირნეს სტილის“ ჭაშეური ღუმელის მახასიათებლები

ღუმელის ტევადობა, ტ	100
ოვალური გარსაცმის „დიამეტრები“, მმ	6100/6550
ჭაშის სიმაღლე, მ	4000
ღუმელის მოცულობა, მ ³	140
გამოშვებული ლითონის რაოდენობა, ტ	90
დარჩენილი თხევადი ფოლადი, ტ	10
ძაბვა ძალოვან ქსელში, კვ	132
სიმძლავრე მოკლე ჩართვისას, მგვა	1100
პირველადი ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, მგვა	65
მეორადი ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, მგვა	85
ღუმელის ტრანსფორმატორის ძაბვა, ვ	487-800
დენის ძალა მაქსიმალური ძაბვისას, კა	53
ელექტროდების დიამეტრი, მმ	610
ელექტროდების განშლის დიამეტრი, მმ	1300
კანგბად-აიროვანი საქშენების რიცხვი	6
საქშენების სიმძლავრე, მგვტ	3
კანგბადის ხარჯი, მ ³ /სთ	3400

ამ მონაცემებიდან ჩანს, რომ განსხვავება ორ მოყვანილ ტექნოლოგიას შორის გამოიხატება გამოშვებულ აირებში არსებული ენერჯის დანაკარგებით. ეს დანაკარგები მცირდება ჭაშეური რკალური ღუმელის მუშაობისას (ჭაშისათვის წყლის ხარჯის მომატების მიუხედავად). ამით შეიძლება დაიზოგოს 20 % ენერჯია. 7 წუთით შემცირდეს დნობის ხანგრძლივობა და ჯამში 14 ტონით გაიზარდოს ღუმელის საათობრივი წარმადობა ანუ წლიური წარმადობა გახდეს 1000000 ტ.

ახალი თაობის ორკორპუსიანი ჭაშეური ღუმელი გაშვებული იქნა საფრანგეთში 1993 წ. ღუმელის ასეთი კონსტრუქციისას შესაძლებელია წლიური წარმადობა გახდეს 1 მლნ. ტ, როდესაც გადმოსხმული ფოლადის მასა 95 ტონაა. ჭაშეური ღუმელის კორპუსები ისე ახლოს არიან ერთმანეთთან, რომ შესაძლებელია ელექტროდების საერთო დამჭერებით მუშაობა. დნობა და კაზმის წინასწარი გახურება ისევე მიმდინარეობს, როგორც ერთკორპუსიან ღუმელში. როგორც კი გამოშვებული აირების ტემპერატურა განსაზღვრულ ზღვარს გადააჭარბებს, მეორე კორპუსში ჩატვირთავენ კაზმს. გამოშვებულ აირებს უშვებენ კორპუსში კაზმის წინასწარი გახურებისათვის. როგორც კი პირველ კორპუსში დაამთავრებენ დნობის პროცესს, იწყებენ ლითონის გამოშვებას, იმავდროულად ელექტროდების დამჭერები გადააქვთ მეორე კორპუსზე და იწყება დნობა. ამ დროს ხდება პირველი კორპუსიდან

ჩვეულებრივი და ჭაშვური რკალური ღუმელების შედარებითი საექსპლუატაციო მონაცემები

მონაცემების სახე	ჩვეულებრივი რკალური ღუმელი	ჭაშვური რკალური ღუმელი
1. ტექნიკური მონაცემები გამოშვებული ლითონის მასა, ტ ლითონის ტემპერატურა გამოშვებისას, °C მიყვანილი აქტიური სიმძლავრე, მგვტ. უანგბად-აიროვანი საქშენების რიცხვი საქშენების სიმძლავრე, მგვტ საქშენების მუშაობის ხანგრძლივობა, წთ.	92 1630 55 4 3 25	92 1630 55 4 3 25
2. ენერჯის მოთხოვნილება (ა) გადნობა ფოლადის გადნობის ერთაღკია, კვტ.სთ. წიდის გადნობის ერთაღკია, კვტ.სთ. დანაკარგები, კვტ.სთ (ბ) დახალასება ფოლადის დახალასების ერთაღკია, კვტ.სთ წიდის წარმოქმნის ერთაღკია, კვტ.სთ დანაკარგები, კვტ.სთ ენერჯის საერთო მოთხოვნილება, კვტ.სთ	29600 4400 14000 5400 600 4000 58000	29600 4400 6800 5400 600 4700 51500
3. ენერჯის მიწოდება ენერჯია საქშენიდან, კვტ.სთ. ეგზოთერმული რეაქციების ენერჯია, კვტ.სთ ელექტროენერჯიების ხარჯი, კვტ.სთ ს'ულ, კვტ.სთ	3700 16600 37700 58000	3700 16600 31200 51500
4. დროის ბალანსი (ა) გადნობის დრო, წთ (ბ) დახალასების დრო, წთ (გ) გაცდენების დრო, წთ. დნობის ხანგრძლივობა, წთ.	32 10 15 57	25 10 15 50
5. 1 ტ თხევადი ფოლადის მიღებაზე დახარჯული ენერჯია და მასალები ელექტროენერჯიის ხარჯი, კვტ.სთ/ტ ელექტროდების ხარჯი, კგ/ტ ნახშირბადის ხარჯი, კგ/ტ აირის ხარჯი, მ ³ /ტ უანგბადის ხარჯი, მ ³ /ტ	410 2.5 11 5.5 25	340 2.0 11 5.5 25
6. მუშაობის ხანგრძლივობა, სთ/წ წარმადობა, ტ/წ	7200 692000	7200 792000

ლითონის გამოშვება, გამოსაშვები ხერჯლის გასუფთავება და ამოვსება, ფერდობის შეკეთება და კაზმის ჩატვირთვა. ასეთი ხერხით დნობისას ღუმელის მოცდენა მინიმუმამდე მცირდება

ენერგეტიკული ბალანსი

	ჩვეულებრივი პროცესი		პროცესი კაზმის გახურებით	
	კვტ.სთ	%	კვტ.სთ	%
1. შემოსავალი სათბობის წვა	40	6	40	7
ელექტროენერჯია	410	65	340	61
ქიმიური რეაქციები	180	29	180	32
სულ	630	100	560	100
2. გასავალი ფოლადი	380	60	380	68
წილა	50	8	50	9
გამავალი აირები	140	22	58	10
წყლით გაცხეება	50	8	50	8
დანაკარგები	10	2	12	2
სულ	630	100	560	100

და ასევე მცირდება ელექტროდების დაუნგვის დრო. ამასთან, 100 ტ ტევადობის ღუმელის წარმადობა აღწევს 140 ტ/სთ-ს. აღსანიშნავია, რომ საამქროს ფართობი, რომელშიც ერთი ასეთი ჭაშეური ღუმელია განლაგებული, არის 45X45 მ², ხოლო სიმაღლე კი - 45 მ გამოსაწოვი გაყვანილობის ჩათვლით.

ელექტროენერჯიის ღირებულების ზრდამ და ეკოლოგიური მოთხოვნების გამკაცრებამ ინგლისური ფირმა „კო-სტილ შირნესის“ იძულებული გახადა რეკონსტრუქცია გაეკეთებინა თავისი რკალური ღუმელებისათვის. ჩვეულებრივი რკალური ღუმელის ენერგეტიკული დანახარჯების ანალიზმა აჩვენა, რომ დახალასების პერიოდში 50 %-ზე მეტი ენერჯია იკარგება გამომაველ აირებთან ერთად. ასეთი ღუმელის რეკონსტრუქციის ჩატარების წინ ფირმის სპეციალისტებმა შემდეგი ამოცანები დაისახეს: მიეღწიათ ევროპაში ყველაზე დაბალი საექსპლუატაციო ხარჯებისათვის; მინიმუმამდე შეემცირებინათ ატმოსფეროში მტვრის გამონასროლები და ხმაურის ზღვარი; გაეზარდათ წარმადობა კაზმის წინასწარი გახურებით; შეემცირებინათ ელექტროენერჯიის ხარჯი კაზმის გადნობაზე 30 %-ით; აქმაღლებინათ წარმოების ეკონომიკური ეფექტიანობა. ამ ამოცანების შესასრულებლად აუცილებლად მიიჩნიეს ჩვეულებრივი რკალური ღუმელის ჭაშეურ ღუმელად გადაკეთება. შედარებითი ტექნიკური მონაცემები მოყვანილია ცხრილებში 10.18, 10.19 და 10.20.

ამრიგად, ჭაშეური ღუმელი უკეთესია ეკონომიკური და ეკოლოგიური თვალსაზრისითაც.

ჩვეულებრივი და ჭაშვური რკალური ღუმელების ტექნიკური მაჩვენებლები

ხარჯი	ჩვეულებრივი ღუმელი	სტანდარტული ჩატვირთვის ჭაშვური ღუმელი	საცდელი ჭაშვური ღუმელი
ელექტროენერჯის, კვტ.სთ/ტ ნაშხადზე	514	360	275
ჟანგბადისა, მ ³ /ტ ნაშხადზე			
(ა) სათბობის წვაზე	3,3	22	35,5
(ბ) აბაზანაში შებერილი ბუნებრივი აირი, მ ³ /ტ ნაშხადზე	12	11	5,5
	1,7	11	17,7

ჭაშვური ღუმელის ძირითადი მახასიათებლები

ღუმელის ტევადობა, ტ	100	ღენის ძალა, კა.	58
მასა, ტ:		ელექტროდების დიამეტრი, მმ	610
ჯართი კაზმში	95,5	ელექტროდების განშლის დიამეტრი, მმ	1300
გამო შეებული თხევადი ფოლადი, ტ	90	ჟანგბად-სათბობის სანთურების რაოდენობა, ც	6
ღუმელში დარჩენილი თხევადი ფოლადი, ტ	10	თითოეული სანთურის გამოყენებული სიმძლავრე, მგვტ.	3
ძაბვა მკეებაე ქსელში, კვ	132	ჟანგბადის ხარჯი გაქრევაზე, მ ³ /ს	2400
სიმძლავრე მოკლე ჩართვის რეჟიმში, მგვტ	1100	ოქალური გარსაცმის დიამეტრი, მმ	6100/655
ტრანსფორმატორის სიმძლავრე, მგვტ		ჭაშვის სიმძლავრე, მმ	4000
პირველადი	65	ჯართის საერთო მოცულობა, მ ³	114
მეორადი	80		
ღუმელის ტრანსფორმატორი (ყლილებების ბიჯი, ე	487-80		

ხარჯების შემცირება ჭაშუური ლუმელის გამოყენებისას რეველებრივ ლუმელთან შედარებით; აშშ დოლ/ტ

ვარგისი ლითონის გამოსაყლის ზრდა 95,5 %-მდე	4,83
ხარჯების შემცირება:	
ციცხვამძლე მასალებზე	0,28
ელექტროდებზე 3,1-დან 2,1-მდე	2,75
გამომავალი აირების მტერისაგან გამასუფთავებელ დანადგარზე (მტერის რაოდენობა გამომავალ აირებში მცირდება 20 %-ით)	1,30
ელექტროენერჯის ხარჯის შემცირება 80-100 კვტ.სთ/ტ	4,70
ხარჯების ზრდა:	
ჟანგბადზე	-1,22
ბუნებრივ აირზე	-0,81
ხარჯების შემცირება სულ	11,83

10.8.4. ციციხე-ლუმელი

იაპონურმა ფირმამ „გოდოსტილ“ დნობის ხანგრძლივობის შესამცირებლად და ლითონის ხარისხის გასაუმჯობესებლად 1991 წელს გადაწყვიტა გამოეყენებინა ლითონის ლუმელსგარე დამუშავება ციციხე-ლუმელში და შემდგომი წლიდან განახორციელა ლითონის გამოშვება ლუმელის ქვედიდან. უკანასკნელის მეშვეობით შესაძლებელი გახდა დაჟანგვითი წილის მოშორება თხევადი ლითონიდან, რაც ამცირებდა ფოსფორის შემდგომ აღდგენას, აადვილებდა განგოგირდებას – ლითონში გოგირდის შემცველობის 0,005 %-მდე შემცირებას. ქვედიდან თხევადი ლითონის გამოშვებისას გარდა იმისა, რომ აღდგენილი ფოსფორის რაოდენობამ 70-დან 20 მეგილიონედამდე მოიკლო, აგრეთვე შემცირდა აღმდგენელი წილის სისქე 350 მმ-დან 250 მმ-მდე. ადრე ლუმელში ახდენდნენ განგოგირდებას, ხოლო შემდეგ კი ამ და დახალასების სხვა ოპერაციებსაც – ციციხე-ლუმელში (მისი ამოქმედების მერე). ფოლადში გოგირდის შემცველობის 0.005 %-მდე შემცირებისათვის გამოყენებულ იქნა CaF-ის შემცველი ფუძე წიდეები. ცდებით დამტკიცდა, რომ ფოლადში გოგირდის ასეთი შემცველობის მისაღწევად საჭიროა წიდაში 40 %-მდე CaF₂ და ასეთი წილის ქვეშ თხევადი ლითონის დაყოვნება ციციხე-ლუმელში

30-45 წუთის განმავლობაში. ასეთ პირობებში $\frac{(S)}{[S]} = 200$ შეფარდება

აღწევს 200.

XI ბანყოფილება

პერსპექტიული ზემოქმედების ღრმადი ფოლადის დნობის, დაყვანის, უწყვეტი ჩამოსხმისა და გლინვის ხაზით

ფოლადის გამოსადნობ აგრეგატებში: კონვერტერში, მარტენის ღუმელში, ორბაზანთანში, სი.პ-პროცესში ყველაზე ღრმა შებერვისას და ბოლოს, ელექტროღუმელებში დნობის პროცესის ინტენსიფიკაციის დროს ჟანგბადით გაქრევა დღემდე ცნობილი ხერხებიდან წყლით საცივებელი მძლავრი ქშინებით, ზემოდან (ყველაზე მეტად გაერცელებულია), ქვემოდან, გვერდიდან, კამარიდან, წინა და უკანა კედლებიდან ჟანგბადის ინტენსიური გაქრევით ხორციელდება. ყველა ზემონაშთოვლილ მეთოდს ბევრი ისეთი ნაკლოვანი მხარე გააჩნია, როგორცაა:

1. კამარიდან, გვერდიდან, უკანა კედლიდან, ზემოდან თუ სხვა კვანძებიდან შებერვა ყოველი ქშინისათვის უმეტეს წილად დამატებითი ხერხის მოწყობას მოითხოვს, რაც არც სადნობი აგრეგატისთვის და განსაკუთრებით, არც მისი ამონაგის შედეგობისთვისაა სასურველი;

2. პროცესის მსვლელობისას ყოველი ხერხი ავარიული სიტუაციის საშიში კერა ხდება, (განსაკუთრებით თხევადი აბაზანის სიღრმეში შებერვისას) რისთვისაც მას წყლით გაცივების დამატებითი სისტემის ქშინებში ან მაცივებელ კესონებში სვამენ;

3. გამაცივებელი სისტემის გამოყენებისას, როგორც ქშინებში, ისე კესონებში ტემპერატურის (სითბოს) დიდი დანაკარგების გამო დაბალია მათი ეკონომიკური მაჩვენებლები;

4. შებერვის მექანიზებულ კვანძებს წყლის გარდა ელექტროენერგიით უზრუნველყოფა ჭირდება, რაც დამატებით ხარჯებს მოითხოვს;

5. ჟანგბადის ხარჯის დიდი ხვედრითი წილის გამო დაბალია მისი გამოყენების კოეფიციენტი და ეკონომიკური მაჩვენებლები;

6. რკინის დიდი რაოდენობით ჟანგვის გამო ლითონის გამოსავლიანობა ნაკლებია, რითაც ეკონომიკური და შესაბამისად ეკოლოგიური მაჩვენებლები უარესდება;

ყველაზე მთავარი ნაკლია დნობის პროცესში გამაცივებელი სისტემის პერმეტულობის დარღვევისას თხევად ლითონთან წყლის შეხებით გამოწვეული აფეთქების საშიშროება.

ყველა ჩამოთვლილი ნაკლოვანი მხარის შესწავლამ რუსთა-ვის მეტალურგიული კომბინატის მარტენის საამქროში სრულიად ახალი, რევოლუციური იდეა დაბადა და იქვე იქნა განხორციელებული დამუხანგველი აირის შებერვა წყლით გაცივების სისტემის გარეშე „რუსთაული“ კონსტრუქციის ქშინით ფოლადის გამოსაშვები ხერელიდან. იმავე დროს ინტენსიფიკაციის პროცესის დასრულების შემდეგ მიძიმე ფიზიკური შრომის გარეშე ხერელიდან ქშინის გამოღებით, ფოლადის ციცხეში გამოშვება განხორციელდა. ცოტა მოგვიანებით კი ასევე წყლით გაცივების სისტემის გარეშე ფოლადის სანამოსხმო შიბერის ხერელიდან შებერვით განხორციელდა ლითონის რაფინირება ინერტული აირებითა და წიდაწარმოქმნიელი მასალა-რეაგენტებით, ნაცვლად ყველაზე გავრცელებული ზემოდან შებერვისა.

ქვემოთ აღწერილია ზემოაღნიშნული პროცესის განვითარების სპეციალური გზები. ბევრი ნატარებული ექსპერიმენტის საფუძველზე შეიქმნა ფოლადსადნობი ხერელიდან აირებისა და ფხვნილოვანი რეაგენტების შესაბერად გამიზნული ახალი ქშინი, რომელიც არ საჭიროებს წყლით გაცივებას. იგი წარმოადგენს ერთმანეთში თანაღერძულად ჩადგმული სხვადასხვა დიამეტრის მქონე ორი ცხლადნაგლინი მილისაგან შექმნილ კონსტრუქციას. ფოლადის გამოსაშვები ხერელის ოპტიმალური განიეკეთის შენარჩუნებისათვის ქშინის გარსაცმად შეირჩა 4 მმ კედლის სისქისა და 83 მმ გარე დიამეტრის მილი, ხოლო ქშინის კედლის იმავე სისქის მქონე შიგა მილის გარე დიამეტრია 69 მმ.

მიღების დიამეტრებს შორის 3 მილიმეტრიანი ღრეოს განიეკეთის ფართობი სავსებით საკმარისი აღმოჩნდა ბუნებრივი აირის გათვლილი რაოდენობის გასატარებლად. შებერვის დროს ის ორ ფუნქციას ასრულებს:

1. კარგად აცივებს ორივე მილს და მთლიანად კონსტრუქციას;

2. რაც მთავარია, იწვის შებერილი დამუხანგველი აირის მეშეობით და მასთან ერთად ინტენსიურად ამოწავს ღუმელში ნატერიული (ნახსმული) თუჯიდან და ფოლადის ჯართიდან კაუბადს, მანგანუმს, ნახშირბადს, გოგირდსა და ფოსფორს.

ქშინის შიგა (ცენტრალური) მილით, რომლის შიგა დიამეტრია 61 მმ, მიეწოდება დამუხანგველი აირი არა ნაკლებ 2 ატ (ტექნიკური ატმოსფეროს) წნევით. ეს წნევა მარტენის 200

ტონიანი ღუმელის შემთხვევაში კმარა იმისათვის, რომ თხევადმა ლითონმა თავისთავად არ გამოეონოს ქვინში ანუ ფოლადგამოსაშვებ ხერელში და ამით მთელი ნაღობი არ დაიღვაროს ღუმელის ქვემოთ, რაც მნიშვნელოვანი მატერიალური ზარალია, სახიფათო და საშიშ ავარიულ სიტუაციაზე რომ აღარაფერი ეთქვამთ.

ასე და ამრიგად შერჩეულმა შესაბერმა ქვინმა კონსტრუქციულად მიიღო ერთმანეთში თანადერსულად (კოაქსიალურად) ჩადგმული მიღების (2 მილი) სახე. მიღებს შორის არსებული ღრეოს სომები პროცესის წასაყვანად საჭირო დამუანგველი და ბუნებრივი აირების მოცულობების გათვალისწინებით შეირჩევა გარე და შიგა მიღების დიამეტრებისა და კედლების სისქეების მიხედვით. ორივე მილი თანაბარი სიგრძისაა და იგი შეირჩევა საღობი აგრეგატის ფოლადის გამოსაშვები ხერელის სიგრძის მიხედვით. რუსთაყის მეტალურგიული ქარხნის მარტენის საამქროში მოქმედი 200-ტონიანი ღუმელისათვის ქვინის სიგრძემ შეადგინა 2,3-2,5 მ.

ხერელში საიმედო ჩამაგრების მიზნით ქვინის გარე ზედაპირზე დაადულდებენ რამდენიმე წიბოს, რომ მისი მეშვეობით ის არ გამოიყრეს შებერვის დროს მოქმედი რეაქტიული ძალის ზემოქმედებით. ქვინის ჩამაგრება მიმდინარეობს ორი მექანიზებული ხერხით. პირველი ხერხი — ღუმელის გასაწყობი მანქანით ხორციელდება მაგნეზიტის ფხენილის მიყრა ღუმელში და ფოლადგამოსაშვები ხერელისა და ქვინის გარე დიამეტრებს შორის არსებული სხვაობის გამო დარჩენილი ღრეოს ამოვსება. მეორე ხერხი — ხერელის ავარიული გახსნის საშიშროების თავიდან აცილების მიზნით მაგნეზიტის ფხენილის შემდეგ ხერელს დამატებით უკეთდება ტორკრეტირება, რისთვისაც ტორკრეტმანქანით მიასხამენ ტორკრეტბეტონს — მაგნეზიტის ან დოლომიტისაგან დამზადებულ სქელ ხსნარს. საჩამოსხმო მალის მხრიდან მეფოლადის პირველი ხელშემწყობი დარჩენილ ღრეოს ამოვსებს მაგნეზიტის ფხენილის ნატკეპნით, რისთვისაც იყენებს სპეციალურ სამარჯვს, შემდეგ კი ცეცხლგამძლე თიხით ხდება ქვინის გარშემო ხერელის ნატკეპნა-მოპირკეთება.

ყველა ამ ოპერაციისას, რაც ძირითადად ფოლადის გამოსაშვებ ხერელში ქვინის ჩადულაბებასთანაა დაკავშირებული, მაღალი წნევის მოქნილი შლანგებით დამუანგველი და ბუნებრივი აირები ქვინში მიეწოდება მინიმალური წნევით, რომ ქვინი ცეცხლგამძლე მასით არ დაიხშოს და თან რეაქტიული ძალის ზემოქმედებით მის შეცხოზამდე არ იქნეს გამოგდებული ხერელიდან.

ხერელში ქვინის ჩაბეტონების შემდეგ კი აირიც და ჟანგბადიც ჩეულებრივი გათვლილი წნევით მიეწოდება ღუმელში მთელი

დნობის განმავლობაში კაზმის ჩატვირთვის დაწყებიდან ნაღნობის გამოშვებამდე.

მეფოლადები ცდილობენ მიიმე ჯართი (ნაგლინის ჩამონატრები და სხვა ხელახლა გადასადნობი წუნდებული პროდუქცია) ძირითადად შუა ფანჯარაში ჩატვირთონ, რათა ქშინი უფრო ეფექტურად იქნეს გამოყენებული დნობის პროცესის დამქარების მიზნით.

პირველი ასეთი დნობა პირველ ღუმელზე განხორციელდა. ჩატვირთვის პერიოდის ხანგრძლივობამ შეადგინა 1,2 სთ. 90 ტ ჩატვირთული ჯართის გახურებაზე დაიხარჯა 45 წთ. ამის შემდეგ განხორციელდა 110 ტ თხევადი თუჯის ჩასხმა ღუმელში. პროცესი ძლიერ სწრაფად წარიმართა. გადნობის პერიოდის ხანგრძლივობამ შეადგინა 1 სთ. ჩანატვირთი კარგად გადნა. დაყვანის პერიოდიც დუღილის ჩათვლით 1 საათში დამთავრდა.

დნობის გასაშვებად გამოყენებული იქნა საჩამოსხმო ამწე, რომლის 50 ტონიანი ტვირთამწეობის კაკის მეშვეობით ფოლადის გამოსაშვები ხერკლიდან გამოსრობილი იქნა ჩადულაბებული ქშინი და ამ ხერხით მსოფლიოში პირველად განხორციელდა ფოლად-სადნობი აგრეგატიდან ნაღნობის გამოშვება. აღნიშნული დნობის ხანგრძლივობამ შეადგინა 4 სთ და 15 წთ, ნაცვლად დაგეგმილი 8 სთ და 30 წთ-სა.

ლითონი კარგად ჩამოისხა სიფონური ხერხით. ფოლადის ტემპერატურა, როგორც მისი გაშვებისას, ისე ჩამოსხმისას, ქარხანაში დამტკიცებული ტექნოლოგიური ინსტრუქციის მიერ გათვალისწინებულ ფარგლებში იყო.

გამოშვებული ნაღნობიდან, ფოლადის ქიმიური ანალიზის მიხედვით, გაიგლინა სიმტკიცის II ჯგუფის სატუმბი-საკომპრესორო მიღები.

ერთხელ ნამუშევარი საქშენი, მომწვარი ბოლოს დადუღებით დაგრძელება-აღდგენის შემდეგ, კვლავ გამოდგა მეორე დნობისათვის. რამდენიმე ასეთი წარმატებულად განხორციელებული დნობის შემდეგ ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორების ანსორ გაბისიანისა და გურამ ქაშაკაშვილის ინიციატივით მარტენის საამქროს მე-8 ღუმელში მთლიანად მყარ ჩანატვირთზე (მყარ თუჯსა და ფოლადის ჯართზე) იმავე ჩქაროსნული ხერხით განხორციელდა დნობა, რასაც მთლიანად მყარ კაზმზე ჩვეულებრივად წარმართული დნობებისაგან განსწავებით 10-11 საათის ნაცვლად დასჭირდა 5 საათი.

დღეისათვის მარტენის ღუმელების მცირე რაოდენობადა შემორჩა მეტალურგიულ ფოლადსადნობ საწარმოებს, ისიც მხოლოდ რუსეთში, უკრაინასა და საქართველოში. როგორც უკვე

აღნიშნეთ, მთელს მსოფლიოში ფოლადის უმეტესი ნაწილი ძირითადად კონვერტირებასა და ელექტროღუმელებში იწარმოება.

უკანასკნელ ხანს მსოფლიოში ფოლადის წარმოების მოცულობა ძირითადად ახალი ზემოქალი ელექტრორკალური ღუმელების მშენებლობის გამო იზრდება. ვინაიდან მათში 1 ტონა ფოლადის საწარმოებლად საჭირო ხვედრითი ენერჯის მთლიანი ხარჯი 30-35 %-ით ნაკლებია, ვიდრე სჭირდება ტრადიციულ მეტალურგიულ ციკლს – კოქსქიმიური წარმოება, აგლომერატის წარმოება, თუჯის წარმოება, ფოლადის წარმოება.

გარდა ამისა ზემოქალი ელექტრორკალური ღუმელი იმითაცაა საინტერესო, რომ მასში ყველანაირი, მათ შორის ლევირებული და სპეციალური ფოლადების წარმოებაც წარმატებით ხორციელდება. მეტად მნიშვნელოვანია ისიც, რომ ამ პროცესის წარმადობამ ჟანგბადით ინტენსიფიკაციის შედეგად გადააჭარბა კონვერტირისას, ხოლო რკინის ჯართის გამოყენება შეუზღუდავად არის შესაძლებელი.

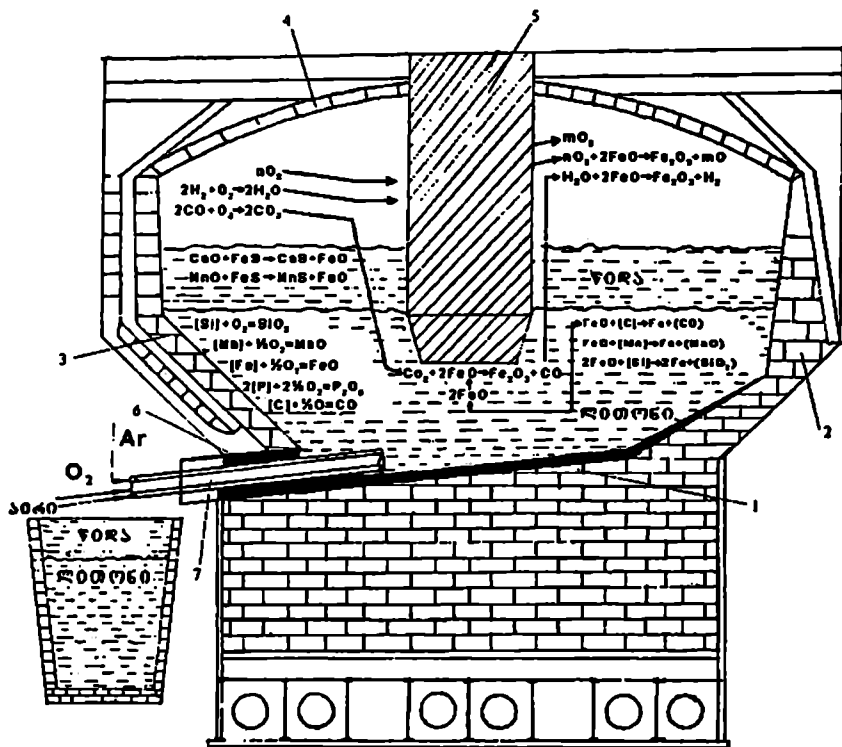
აღსანიშნავია, რომ ელექტროფოლადის წარმოების ერთიან ხაზში წარმატებით გამოიყენება ფოლადის განჟანგვა-ლევირება-რაფინირებისათვის განკუთვნილი ციცხე-ღუმელი (ანუ სხვანაირად, ციცხეში ფოლადის დამუშავების აგრეგატი), ფოლადის უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა-დანადგარები და მათთან შერწყმული საგლინავი მოწყობილობა – უწყვეტად ჩამოსხმული სლაბების ან ნაშბადის შემახურებელი ღუმელი (ინდუქტორი) და საგლინავი დგანი, რომლითაც ხორციელდება სასურველი ზომების ლითონპროდუქციის გლინვა უწყვეტი ციკლით.

აღნიშნულ ტექნოლოგიურ ციკლში უწყვეტი სხმულების ტემპერატურის მაქსიმალური გამოყენების შედეგად ნაგლინის თვითღირებულება საგრძნობლად იაფდება.

ქმინით ხერხელიდან შებერვის ტექნოლოგიის გამოყენება საშუალებას იძლევა სტაციონარულ რეჟიმში მომუშავედ გარდაექმნათ ელექტროღუმელი, რომელსაც დახრის მექანიზმით მხოლოდ ფოლადის გამოშვების პროცესის ნორმალურად წარმართვისათვის აღჭურავენ. ღუმელის ყოველი დახრა და საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება ამცირებს მისი როგორც მექანიკური ნაწილის, ისე ცეცხლგამძლე მასალების მედეგობას, რაც ამცირებს ფოლადის თვითღირებულებას ცეცხლგამძლე მასალების ხვედრითი წილის ზრდისა და რაც მთავარია, ხელით შრომის გამო.

სტაციონარული ღუმელის მუშაობას აღარ ესაჭიროება ელექტროენერჯია დახრის მექანიზმისათვის და რაც მთავარია, ხერხელიდან ფოლადის გამოშვების უმძიმესი ოპერაციისაგან თავისუფლდებიან მეფორლადეთა ბრიგადები.

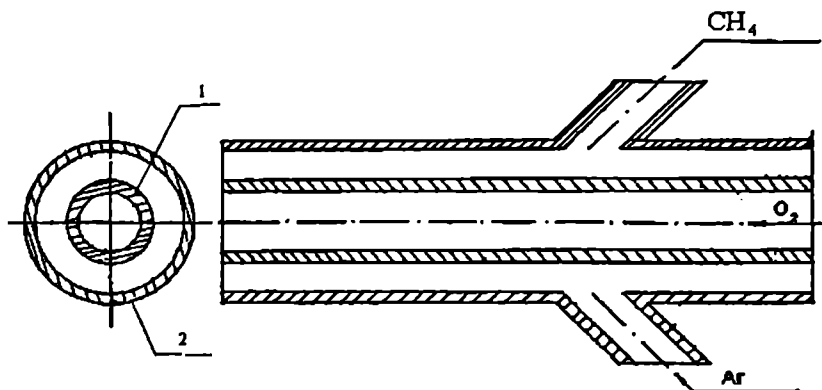
ზემილაური სტაციონარული ელექტროლუმელის სქემატური ნახაზი ზემოაღნიშნული ტექნოლოგიის გამოყენებით წარმოდგენილია სურათზე 11.1.



სურ. 11.1 ზემოაღნიშნული სტაციონარული ელექტროლუმელის ფოლადის წარმოების პროცესის ფოლადის გამოსაშვებ ხერელებში ჩადგობადებული ქვინიდან აირებისა და ფხვნილოვანი რეაგენტების შებერვა-შეფრქვევით და ფოლადგამოსაშვები ხერელების მექანიზებული გახსნით
 1 - ქვედი; 2 - წინა კედელი; 3 - უკანა კედელი; 4 - კამარა; 5 - ელექტროდი; 6 - ფოლადის გამოსაშვები ხერელი; 7 - ქვინი; 8 - ციცხვი

აღნიშნული ზემოაღნიშნული რკალური ფოლადსადნობი ელექტროლუმელი იმით განსხვავდება ანალოგებისაგან, რომ ფოლადის გამოსაშვები ხერელი განლაგებულია ქვედის მუშა ზედაპირის უდაბლეს დონეზე ღუმელის უკანა კედლის ძირში; ამ ხერელში ცეცხლგამძლე მასალის საშუალებით ჩადგობადებულია ქვინი (სურ. 11.2) ღუმელის სამუშაო სივრცეში ერთი ან რამდენიმე აირისა და ფხვნილოვანი რეაგენტების წნევით შესაყვანად, ხოლო

ჩადუღაბებული ქშინი და ცეცხლგამძლე მასალა ასრულებს ხერელის ხაცობის ფუნქციას.



სურ. 11.2 ფოლადსადნობი აგრეგატის ხერელიდან აირებისა და ფხენილოვანი რეაგენტების შესაბერი და დნობის გამოსაშვები ქშინი
1 - შიგა მილი; 2 - გარე მილი

აღნიშნულ ღუმელში ფოლადის გამოდნობის ხერხი ითვალისწინებს კაშმის ჩატვირთვა-გადნობას, თხევადი ლითონის დაყვანა-რაფინირებასა და ნადნობის გაშვებას, რასაც ახორციელებენ ხერელიდან, რომელიც განთავსებულია ქვედის მუშა ზედაპირის უდაბლეს დონეზე ღუმელის უკანა კედლის ძირში. ამ ხერელში თავსდება და ცეცხლგამძლე მასალით ბეტონდება არაერთჯერადი გამოყენების ქშინი, რომლითაც კაშმის ჩატვირთვამდე და მის შემდეგ, დნობისა და დუღილის პერიოდებში ჯერ ხორციელდება ლითონის გაქრევა ერთდროულად ბუნებრივი აირითა და ჟანგბადით ისე, რომ მათი წნევა აღემატებოდეს აბაზანაში მყოფი ლითონის სვეტის წნევას 0,05-0,25 მეგაპასკალით, ხოლო შემდეგ - ნადნობის გამოშვებამდე 5-20 წუთის განმავლობაში, იგივე წნევის ერთი ან რამდენიმე ინერტული აირით ფხენილოვან რეაგენტებთან ერთად.

სხვა ზემოქმედებებთან შედარებით, ზემოაღწერილი ღუმელის გამოყენება ამარტივებს ფოლადის მიღების ტექნოლოგიას, ვინაიდან საჭირო აღარაა დამატებითი ხერელის მოწყობა და მისი მოვლა, ღუმელის დახრა და დახრის მექანიზმი; გაუმჯობესდება ღუმელის კამარისა და ამონაგის მედეგობა, ვინაიდან მათზე აღარ იმოქმედებს ღუმელის დახრით გამოწვეული მნგრეველი ძალები.

ასეთ ღუმელში დნობის ჩასატარებლად ხორციელდება შემდეგი ოპერაციები: ხერელის გაწმენდა; ქშინის შეტანა ხერელსა

და ღუმელის სამუშაო სივრცეში - აბაზანაში; ქშინის დაფარვა ცეცხლგამძლე ფხენილით და მასით; ქშინსა და ხერელს შორის არსებული ღრეოს ამოვსება ცეცხლგამძლე მასით (ქშინის ჩაბეტონება); ლითონის მიმღები ციციხვის დადგმა სპეციალურ სტენდზე; ნადნობის გამოსაშვები ღარის მიდგმა ღუმელზე; ღარისა და ღუმელის ცეცხლგამძლე აგურებით ან მასით შეპირიპირება და შემდგომში გაშრობა ბუნებრივი აირით; ღუმელის სამუშაო სივრცეში ჟანგბადისა და ბუნებრივი აირის მიწოდება მკვირვ წნევით; ღუმელის სამუშაო სივრცეში ხერელსა და ქშინზე მიყრილი ცეცხლგამძლე ფხენილისა და მასის შეცხოვა; კაზმის ჩატვირთვა და ელექტრორკალის ანთება; ჟანგბადისა და ბუნებრივი აირის წნევის გაზრდა სათანადო დონემდე; კაზმის გადნობა; გამდნარი ლითონის სასურველ დონემდე გახურებისა და ნახშირბადის სათანადო დონემდე დაყვანის შემდეგ ჟანგბადის ნაცვლად ერთი ან რამდენიმე ინერტული აირისა და ფხენილოვანი რეაგენტების მიწოდება; ქშინის გამოღება-გამოძრობა და ლითონის გამოშვება ციციხეში.

აღნიშნული კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური სიახლე საშუალებას იძლევა გაეზარდოს ღუმელის წარმადობა გადნობის პროცესის დაჩქარების მეშვეობით და ნაწილობრივ (ან ზოგ შემთხვევაში სრულიად) გამოვირიცხოთ ლითონის ღუმელსგარე დამუშავება.

სამილე ფოლადის წარმოების ერთ-ერთ უაღრესად საპასუხისმგებლო ოპერაციად ითვლება თხევადი ლითონის განჟანგვა.

დადგენილია, რომ ფოლადის განჟანგვის პროცესსზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ლითონის მეორადი დაჟანგვა ღუმელიდან ციციხეში გამოშვების და ციციხიდან უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანაზე ან ბოყეებში ჩამოსხმის პერიოდში.

მეორადი დაჟანგვის პროცესების ინტენსიური განვითარება პრაქტიკულად ნიველირებას უკეთებს წინასწარი განჟანგვის შედეგებს და ზრდის ფეროშენადნობების დანაკარგს. ასევე მიზანშეუწონლად უნდა ჩაითვალოს ლითონის განჟანგვა ციციხეში აღუმინის დიდი (2-3 კვ/ტ) რაოდენობით, რადგან ამ შემთხვევაში აღმინება ციციხის საჩამოსხმო ჭიქის დაეწროება და ჩამოსხმის პროცესის ავარიულ რეჟიმში წარმართვა. გარდა ამისა, მეორადი დაჟანგვის პროცესის განვითარების შედეგად ადგილი აქვს აღუმინის დიდ დანაკარგს და მის არარაციონალურ გამოყენებას.

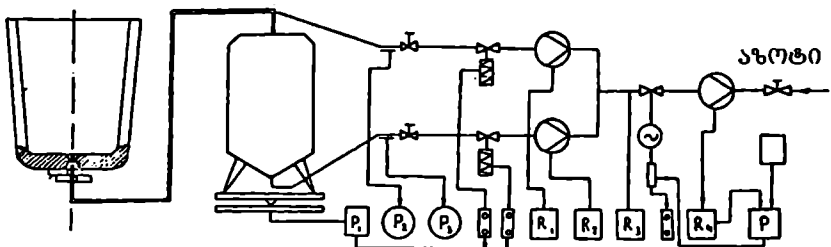
ასევე დადგენილია, რომ ტუტემიწათა ელემენტების (Mg, Ca, Ba) უაღრესად მაღალი განჟანგვის უნარის მიუხედავად არ ხერხდება მისი სრული რეალიზაცია თხევადი ფოლადის განჟანგვისას

ამ ელემენტების შემცველი შენადნობებით მაგნიუმის და კალციუმის ორთქლად ქცევისა და ფოლადში ბარიუმის პრაქტიკულად უხსნადობის გამო.

ციცხეში თხევადი ფოლადის განჟანგვისას სასურველია ჯერ ალუმინის ან მისი შენადნობების, ხოლო შემდეგ კი სხვა განმჟანგველების (Si, Mn) მიწოდება. თხევადი ფოლადში კალციუმის მიწოდება სასურველია ისეთი მრავალკომპონენტური შენადნობების სახით, რომლებიც შეიცავს ალუმინსა და სილიციუმს. ამ შემთხვევაში ალუმინი გამოიყენება როგორც განმჟანგველი, ხოლო კალციუმი კი როგორც მოდიფიკატორი.

ერთ-ერთი მთავარი მოთხოვნა ლითონის მიმართ უწყვეტი ჩამოსხმის დროს არის მანვე მინარევების დაბალი შემცველობა, უმთავრესად კი - გოგირდის, აირების (წყალბადი, აზოტი) ოქსიდური და სულფიდური ჩანართების მინიმალური რაოდენობა, რაც უზრუნველყოფს ფოლადის სიმტკიცისა და პლასტიკურობის ზრდას მღალ ტემპერატურებზე, ამცირებს მის მიდრეკილებას ბზარის გაჩენისადმი და შედეგად შესაძლებელი ხდება ჩამოსხმის სინქარის გაზრდა.

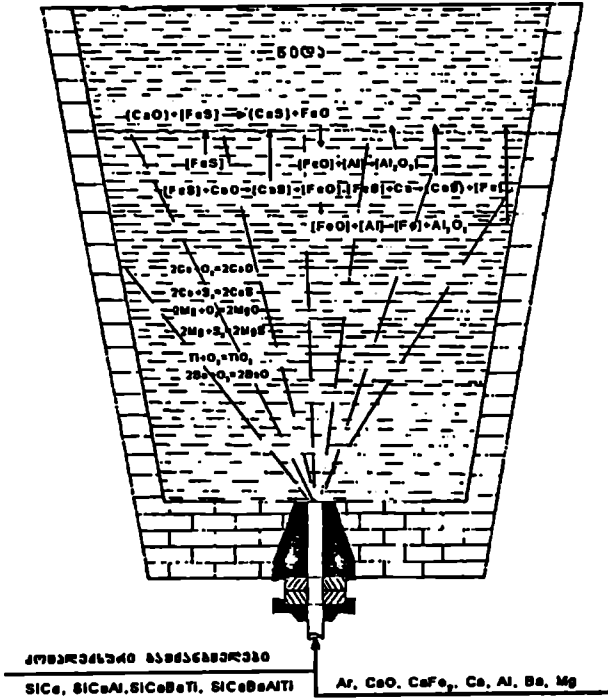
მანვე მინარევების შემცველობის შესამცირებლად, როგორც ადრე აღვნიშნეთ (იხ. VIII განყოფილება), ქართველი მეტალურგების მიერ შემუშავებული იქნა ფოლადის ღუმელსგარე - საჩამოსხმო ციცხეში დამუშავების უაღრესად პრაქტიკული, კომპლექსური ტექნოლოგია „რუსთაველი“ და შესაბამისი დანადგარი, რომელიც სქემატურადაა ნაჩვენები სურათზე 11.3.



სურათი 11.3. ინერტული აირებითა და ფხვნილოვანი რეაგენტებით ციცხეში თხევადი ლითონის დამუშავების „რუსთაველი“ დანადგარის ტექნოლოგიური სქემა

ეს ტექნოლოგია ითვალისწინებს ციცხეში ლითონის დამუშავებას წიდაწარმოქმნელი ნარევებით, ინერტული აირებითა და ფხვნილოვანი რეაგენტებით. ციცხეში აირებისა და ფხვნილოვანი რეაგენ-

ტების შებერვა ხორციელდება ინექციური მეთოდით (სურ 11.4) შიბერის ფოლადგამოსაშეებ ხერელში ჩამაგრებული 14-18 მმ ღიამეტრის მილის საშუალებით.



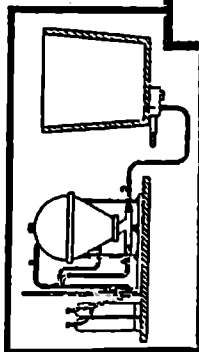
სურათი 11.4. ციციხეში თხევადი ლითონის გაქრვის ინექციური მეთოდი

ეს ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა განხორციელდეს ღუმელსგარე დამუშავება ნებისმიერ საამქროში, სადაც ციციხეები აღჭურვილია შიბერით და არსებობს არგონის ან აზოტის წყარო. ფოლადის დამუშავება იწყება მისი გამოშვების დროს, ასევე - ციციხის შევსებისა და დნობის გამოშვების შემდეგაც. ვინაიდან აირისა და ფხვნილოვანი რეაგენტების შებერვა ხორციელდება ციციხის ყველაზე დაბალი წერტილიდან, დამუშავების ეფექტურობასაგრიობლად მაღალია.

დღეისათვის აირისა და ფხვნილოვანი რეაგენტების ციციხეში შებერვისათვის საჭირო მარტივ მოწყობილობას შემდგომი გაუმჯობესება არ განუცდია, თუმცა ამ მიმართულებით მსოფლიოში ინტენსიურად მიდის კვლევა-ძიება. სულ ახლახან, 2002 წლის 26-27 სექტემბერს თუჯისა და ფოლადის დესულფურაციის საკითხებთან დაკავშირებით ავსტრიის ქალაქ ანიფში ჩატარდა VII

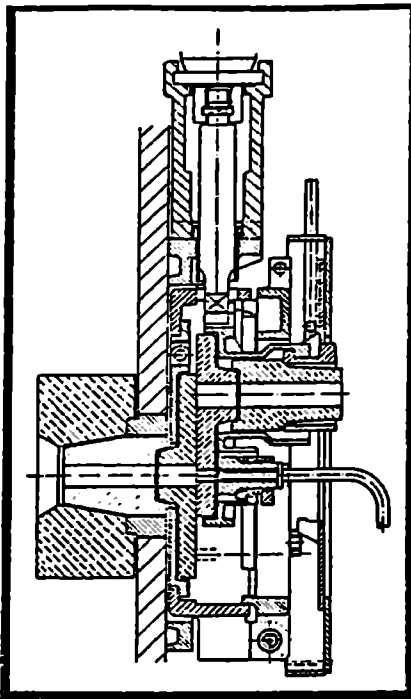
საერთაშორისო სიმპოზიუმი. სიმპოზიუმის მასალებში გამოქვეყნებულია ციციხეში თხევადი ლითონის დამუშავების გერმანული ტექნოლოგია და მოწყობილობა (სურ 11.5), რომელიც სიმპოზიუმზე

შიბრის შიბრული სისტემით (Slide Gate)



პრინციპი

დეტალები



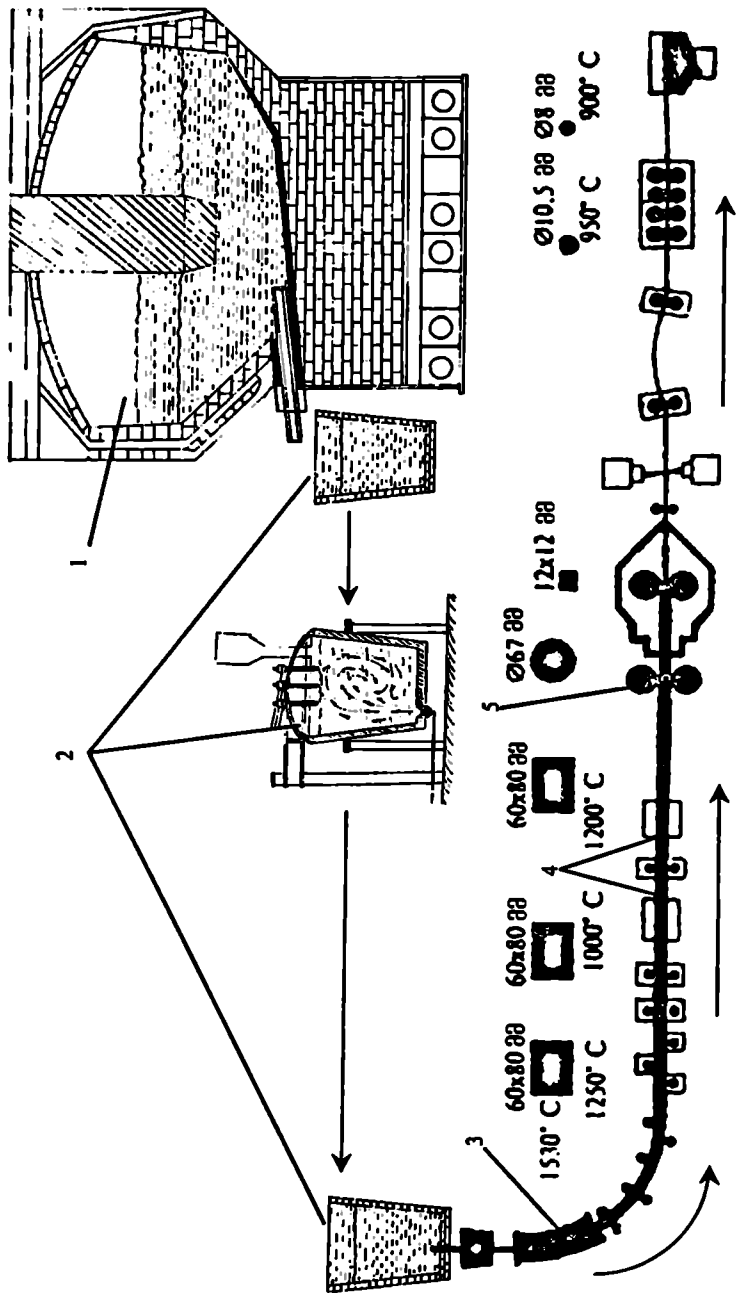
ნაპროექტანბანი:

- აუცილებელია ციციხის გაწვანარ ბაშოღბი
- უწყვეტი წამოსახისათვის
- შიბრისათვის საჭირო საკუთარი შიბრის უძიხნა კვირია



ThyssenKrupp

სურათი 11.5. ციციხეში თხევადი ლითონის დამუშავების გერმანული ტექნოლოგია და მოწყობილობა (ატისსენ-კრუპ ტექნოლოჯისის კომპანია „პოლიტექსი“)



სურათი 11.6. ფოლადის წარმოების უახლესი ტექნოლოგიური ხაზის სქემა.

1. ზემოდავარი რკალური კლასტროლუმელი;
2. ციხე-დუმელი;
3. ფოლადის უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანა;
4. ინდუქციური ღუმელი;
5. საგლინაგი ხაზი.

წარმოადგინა „ტისსენ-კრუპ ტექნოლოჯისის“ კომპანია „პოლი-
ზიუსმა“. „პოლიზიუსის“ მიერ წარმოდგენილ შიბერს ორი ხერედი
აქვს: ერთი – ლითონის ჩამოსასხმელად, მეორე კი – ციცხეში
აირებისა და რეაგენტების შესაბერად. ორი ხერედის არსებობა
აროულებს შიბერის კონსტრუქციას, თანაც დამატებითი ხერედი
შესაძლო დამატებითი პრობლემების პოტენციური წყაროა. რაც
მთავარია, ამგვარი გართულება ბოლომდე ვერ წყვეტს „რუსთაუ-
ლი მეთოდის“ ერთ-ერთ ნაკლს – ჩამოსხმის დაწყებისათვის
უნაბადის გამოყენებას ჭიქის ხერედის გათავისუფლების მიზნით.
ამგვარად დასტურდება, რომ ციცხეში აირებისა და ფხვნილოვანი
რეაგენტების შებერვის „რუსთაულ“ ტექნოლოჯიას ამ მომენტი-
სათვის მოწი ნავე პოზიცია უჭირავს მსოფლიოში.

სემოთქმულის შეჯამებით შეიძლება ითქვას, რომ ფოლადის
წარმოებაში უახლოესი პერსპექტივაა ტექნოლოგიური ხაზი ზე-
მილაერი სტაციონარული ფოლადსადნობი ელექტრორკალური
ღუმელით, ციცხე-ღუმელით, უწყვეტი ჩამოსხმის მანქანითა და
მასთან შერწყმული საგლინავი მოწყობილობით – შემახურბელი
ღუმელით (ინდუქტორი) და საგლინავი დგანით (სურ. 11.6).

ლიტერატურა

I განყოფილებისათვის

1. ქართული საბჭოთა ენციკლოპედია.—თბილისი, 1983.—ტ.6
2. ნ. რეხვიაშვილი. ქართული ხალხური მეტალურგია.—თბილისი: მეცნიერება, 1966.—274 გვ.
3. დ. ხახუტაიშვილი. გასული „კომუნისტი“, თბილისი, 1989, №58 (20399), 10.03
4. ე. ნიციკაძე. ლ. კაპანაძე. ჰიდრომეტალურგია.—თბილისი: საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 1992, 124 გვ.
5. Производство чугуна и стали.—т. 5.—М.:Металлургия, 1972
6. РЖ Metallургия.—1975.— №8.— 8B28.
7. РЖ Metallургия.—1984.— №2.— 2B9
8. Metallург.—2000.— №2
9. Баймаков Ю. В., Журип А.И. Электролиз в гидрометаллургии.—М.: Metallургиздат, 1963.—616 с
10. Брокгауз Ф. А., Ефрон И. А. Энциклопедический словарь.—С-Петербург, 1893, т. IX; 1894, т. XI.
11. Б. С. Э.—М., 1972, т. 8; 1972, т. 9; 1974, т. 16; 1975, т. 19; 1975, т. 21. 1976, т. 25; 1978, т. 30;
12. Гзелишвили И. А. Железоплавильное производство в Древней Грузии. Тбилиси: Мещниереба, 1964.—122 с.
13. Лебедев Б. Г. Введение в металлургию чугуна и стали.—М.:Металлургиздат, 1951.—344 с.
14. Колчин Б. А. Техника обработки металла в Древней Руси.—М.:Машгиз, 1953.—160 с.
15. Липин В. Н. Металлургия чугуна, железа и стали.—Санкт-Петербург и М.: Изд. товарищества М.О. Вольфъ, 1911.—т. II.—928 с.
16. Липин В. Н. Металлургия чугуна, железа и стали.—Л.: НХ-Т изд. ВСЕХИНПРОМ ВСНХ СССР, 1930.—т. II, ч. I.—510 с.
17. Беккерт М. Железо. Факты и легенды.—М.:Металлургия, 1988.—240 с.
18. Линчевский Б. В. Вакуумная металлургия стали и сплавов.—М.: Metallургия, 1970.—258 с.
19. Фарнасов Г. А., Фридман А. Г., Каринский В. Н. Плазменная плавка.—М.: Metallургия, 1968.—172 с.
20. Краснов А. Н., Шаривкер С. Ю., Зильберберг В. Г. Низкотемпературная плазма в металлургии.—М.: Metallургия, 1970.—216 с.

21. *Металлургия стали* / Абросимов Е. В., Аншелес И. И., Кудрин В. А., Кряковский Ю. В., Орлов В. И.–М.:Метлургия, 1964.–368 с.
22. ქართული მეცნიერებისა და ტექნიკის სიახვეე გიორგი ნიკოლაძე: საიუბილეო კრებული / შემდგენელ-რედაქტორები ტექნ. მეცნ. კანდ. ქ. მახარაძე, ინჟ. ზ. აბულაძე.–თბილისი, 1999.–191 გვ.–(დაიბეჭდა შპს-ში 'ფორმა')
23. გამოსენილი მეტალურგი და მეცნიერი ნიკოლოზ ქაშაკაშვილი: საიუბილეო კრებული / შემდგენელი, ინჟ. ზ. აბულაძე; რედაქტორი, ტექნ. მეცნ. კანდ. ქ. მახარაძე.–თბილისი, 1999.–290 გვ.
24. გამოსენილი მეტალურგი და მეცნიერი ნიკოლოზ ქაშაკაშვილი: საიუბილეო კრებული.–მე-2 შეესებულები გამოცემა.–მთავარი რედაქტორი, ტექნ. მეცნ. დოქტ. პროფ. გ. ქაშაკაშვილი; შემდგენელი ინჟ. ზ. აბულაძე.–თბილისი: საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის საწარმო-საგამომცემლო გაერთიანება "მეცნიერება", 2000.–320 გვ.

II განყოფილებისათვის

1. Жуховицкий А. А., Шварцман П. А. Физическая химия.–М.:Металлургия, 1978.–676 с.
2. ლ. ბერეჟიანი. ფიზიკური ქიმიის კურსი.–თბილისი: განათლება, 1987.–501 გვ.
3. Сигов А. А. Теория металлургических процессов.–Киев:КПИ МВО УССР, 1959.–Т. 1.–208 с, Т.2.–139 с.
4. Кубашевский О., Оллок С. Б. Металлургическая термехимия.– М.: Металлургия, 1982.–391 с.
5. Эллийот Д. Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термехимия сталеплавильных процессов / перевод с англ.– М.: Металлургия, 1969.–252 с.
6. Производство стали в электропечах: Сб. статей / Комитет по физической химии производства стали.–часть II.–М.:Металлургия, 1965.–424 с.
7. Григорян В. А., Белянчиков Л. И., Стомахин А. Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов.–М.:Металлургия, 1987.–271 с.
8. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций / Крестовников А. Н., Владимиров Л. П., Гуляницкий Б. С., Фишер А. Я.– М.:Металлургияиздат, 1963.–416 с.
9. Владимиров Л. П. Быстрые методы приближенного и точного расчета равновесия // ЖФХ.– 1956.–Т.30.–Вып. 6
10. Gaskell D.R. Introduction to metallurgical Thermodynamics.–New-York: Mc.grow-Hill, 1973.–520 p.
11. გ. ლომთათიძე, ფოლადის მეტალურგიის თეორიული საფუძვლები.–თბილისი: საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტი, 1986.–120 გვ.

12. Вагнер К. Термодинамика сплавов.—М.: Металлургиздат, 1957.—179 с.
13. Lupis C. H. P.—Chemical Thermodynamics of Materials.—New-York: Elsevier, Sci Publ. Co. Inc. 1983.—583 p.
14. Даркен А. С., Гурри Р. В. Физическая химия металлов.—М.: Металлургиздат, 1960.—582 с.
15. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов.—М.: Металлургия, 1988.—288 с.
16. Кожеуров В. А. Термодинамика металлургических шлаков.—Свердловск: Металлургиздат, 1955.—163 с.
17. Hardi H.K // Acta Metallurgica.—1953.—v.1.—P. 202—209.
18. Lupis C. H. P., Elliot J. F. // Acta Metallurgica.—1967.—v.15.—N2.—P. 265
19. Guggenheim E.A. Mixtures.—Oxford, 1952.—270 p.
20. Chipmann J. // J. Iron Steel Ins.—1955.—v.180.—N2.—P. 97
21. Turkdogan E. T., Pearson J. // J. Iron and Steel Inst.—1953.—v. 173.—N12.—P. 217—223.
22. Темкин М. И. Введение в теорию растворов и ее применение в металлургии // Труды I конференции по Физико-химическим основам производства стали.—М.: Наука, 1951.—С.504—554.
23. Самарин А. М., Шварцман Л. А. Распределение кислорода и серы между расплавленным железом и основными шлаками // Известия АН СССР, ОТН.—1948.—№ 9.—С. 1457—1462
24. Пономаренко А. Г. // ЖФХ.—1974.—Т. 48.— № 7.—С. 1668—1671
25. Floridis T.P. Chipman J. // Trans. Met. Soc. AiME.—1958.—v. 212.—P.549—554
26. Taylor C.R., Chipman J. // Trans of AiME.—1943.—v. 154.—P. 228
27. Островский О. Н., Стомахин А. Я., Григорян В. А. // Известия АН СССР, Металлы.—1977.— № 1.—С. 81—85
28. Sigworth G.K., Elliot J.F. // Metal Science.—1974.—v. 8.—P.248—310
29. Свяжин А. Г., Чурсин Г. М., Вишкарев А. Ф., Явойский В. И. // Металлы.—1974.— № 5.—С.24—35
30. Баня Я. Ш., Фува Т. // Физико-химические основы металлургических процессов.—М.: Наука, 1973.—С. 225—235
31. Вайсбурд С. Е., Дюбанов В. Г., Зедина И. И. и др. // Черная металлургия.—1972.— № 1.—С. 53—55.—(Известия вузов)
32. Venal W.V., Geiger G.H. // Metal Transactions.—1973.—v.4.— P. 2567—2573
33. Финчем С., Ричардсон Ф. // Проблемы современной металлургии.—1955.— № 1.—С. 5—24
34. Richardson F.D. Physical Chemistry of Metals in Metallurgy.—London a. New-York: Acad Press, 1974.— v.1,2.—537 p.
35. Abracham K., Richardson F.— J. Iron and Steel Institute.—1960.—v.196.—N3.— P. 313—317.
36. Бараташвили И. Б. Теоретические основы дефосфорации и десульфурации марганца и сплавов на его основе.—Тбилиси: Мецниереба, 1987.—157 с.

37. Островский О. И., Вайсбурд С. И., Григорян В. А. и др. // Черная металлургия.–1976.– № 3.–С.55–58.–(Известия вузов)
38. Winkler T.B., Chipman J. // Trans AiME/–1946/–v. 167.–P.111.
39. Suzuku Kenichiro, Sanbongi Koji // J.Iron and Steel Inst Japan.–1972.–v.58.–N12.–P.1594.
40. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали.–М.: Металлургия,1973.–311с.
41. Сюй Цзен-Цзи, Поляков Л.Ю., Самарин А.М. // Черная металлургия.–1959.–№11.–с.3–12.–(Известия вузов)
42. Куликов И.С. Раскисление металлов.–М.:Металлургия,1975.–504с.
43. Явойский В.И. Теория процессов производства стали.–М.:Металлургия.1967.–729с.
44. Раскисление и легирование стали экзотермическими ферросплавами / Баптизманский В.И., Исаев Е.И., Жигулин В.И., Янкелевич Я.П.–Киев: Техника,1970.–180с.
45. Мchedlishvili V.A. Термодинамика и кинетика раскисления стали.–М.:Металлургия,1978.–288с.
46. გ. ღომთათიძე, მეტალურგიული პროცესების ფიზიკური ქიმია. მოკლე კურსი.–I ნაწ.–თბილისი:საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2001.–130 გვ.
47. Куликов И.С. Раскисление металлов.–М.:Металлургия,1975.–504с
48. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали.–М.: Металлургия,1989.–416 с.
49. Попель С. И., Сотников А. И., Бороненков В. Н. Теория металлургических процессов.–М.:Металлургия,1986.–463 с.

III განყოფილებისათვის

1. Металлургия стали / Абросимов Е. В., Аншелес И. И., Кудрин В. А., Кряковский Ю. В., Орлов В. И.–М.:Металлургияиздат,1961.–680 с.
 2. Лапицкий В. И., Ступарь Н. И., Легкоступ О. И. Металлургия стали.–М.:Металлургияиздат. 1963 г., 328 с.
 3. Конверторные процессы производства стали / Лапицкий В. И., Левин С. Л., Легкоступ О. И., Ступарь Н. И., Афанасьев С. Г.– М.: Металлургия, 1970.–280 с.
 4. Металлургия стали / Явойский В. И., Левин С. Л., Баптизманский В. И., Умрихин П. В., Меджибожский М. Я., Поволоцкий Д. Я., Ойкс Г. Н., Черненко М. А., Абросимов Е. В.–М.:Металлургия,1973.–816 с.
 5. Якушев А. М. Справочник конверторщика.–Челябинск: Металлургия,1990.–448 с.
 6. Афанасьев С. Г. Краткий справочник конверторщика.–М.:Металлургия,1967.–160 с.
49. ფოლადის მეტალურგია

IV განყოფილებებისათვის

1. Трубин К. Г., Ойкс Г. Н. *Металлургия стали.*—М.:Металлургиздат, 1951.—764 с.
2. *Металлургия стали* / Абросимов Е. В., Аншелес И. И., Кудрин В. В., Кряковский Ю. В., Орлов В. И.—М.:Металлургиздат, 1961.—680 с.
3. *Металлургия стали* / Явойский В. И., Левин С. Л., Балтизманский В. И., Умрихин П. В., Меджибожский М. Я., Поволоцкий Д. Я., Ойкс Г. Н., Черненко М. А., Абросимов Е. В.— М.:Металлургия, 1973.—816 с.
4. Кудрин В. А. *Металлургия стали.*—М.:Металлургия, 1989.—560 с.
5. Иванцов Г. П., Василивицкий А. В., Смирнов В. И. *Непрерывный сталеплавильный процесс.*—М.:Металлургия, 1967.—148 с.
6. Казаков А. А. *Непрерывные сталеплавильные процессы.*—М.: Металлургия, 1977.—272 с.
7. *Технология и установки непрерывного способа производства стали* / Балтизманский В. И., Лысенко И. В., Паниотов Ю. С., Яковлев Ю. Н., Мазов В. Ф.—Киев:Техника, 1978.—192 с.
8. Бигеев А. М. *Непрерывные сталеплавильные процессы.*— М.: Металлургия, 1986.—136 с.
9. *Металлургическое топливо:Справочник* / Равич М. Б., Дворин С. С., Ленков А. Я., Певзнер С. И.— М.:Металлургия, 1965.—472 с.
10. Кожевников И. Ю. *Бескоксовая металлургия железа.*—М.:Металлургия, 1970.—336 с.
11. *Применение брикетированных материалов в мартеновской печи* / Хвичия А. Т., Микадзе О. Ш., Ломтатидзе Г. А., Твалавадзе И. М., Артилаква Д. А. // *Черная металлургия (Бюллетень научно-технической информации).*—1981.—С. 39—41

V, VI და X განყოფილებებისათვის

1. Окоороков Н. В. *Дуговые сталеплавильные печи.*—М.:Металлургия, 1971.—344 с.
2. *Дуговые электропечи* / Строганов А. И., Сергеев Г. Н., Лабунович О. А., Маркелов А. И.—М.:Металлургия, 1972.—288 с.
3. *Электрометаллургия стали и ферросплавов* / Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Рысс М. А., Строганов А. И., Ярцев М. А.—М.:Металлургия, 1974.—550 с.
4. Крамаров А. Д. *Производство стали в электропечах.*—М.:Металлургия, 1969 г., 350 с.
5. Сидоренко М. Ф. *Теория и технология электроплавки стали.*—М.:Металлургия, 1985.—270 с.

6. Зусман Л. Л. *Металлический фонд хозяйства СССР*.—М.:Металлургия,1975.—408 с.
7. Problem relating to iron a steel scrap New-York ООН.—1971.—SJ/ECF/Steel/ N3.
8. Зусман Л. П. *Кругооборот металла в народном хозяйстве СССР*.—М.:Металлургия,1978.—200 с.
9. Kootz Th. Lenzmann K. Altgeld A. // *Thyssen Forschung*.—1973.—Т. 5.—Hf2.—s. 49—77
10. Морозов А. Н. *Современное производство стали в дуговых печах*.—1983.—С. 15—174
11. Морозов А. Н., Галян В. С., Ломма К. П. и др. *Производство электростали* // Науч. тр / НИИМ.—Челябинск:Кн. изд-во 1972.—выпуск 1.—С. 3—8
12. Морозов А. Н. // *Сталь*.—1974.—№4.—С. 319—323
13. *Scrap Age*.—1977.—v. 34.—N8.—P.138—164
14. King James F. *World-cap acity report for liquid steel* // *Skill Mining Rew.*—1984.—v. 73.—N48.— P. 6—7
15. Holschuh Lenhard J. [iS] 18-th annual meeting in Chicago: hope for the stabilization of the situation.— MPT.— 1984.—v. 7.—N6, 8, 10, 12—13.
16. J. Fuel // “Nenryo kyokaishi, Soc Jap”.—1984.—v. 63.—N7.—P. 487—514
17. *Electrik arc sector eyes growth* // *Metal Bull.*—1986.—N7069.—P. 24—25
18. Skillings David N. // *IISI—19 in London. Jr. “Skill Mining Rev”*.—1985.—v. 74.—N45.—P. 4—15.
19. Рогачева Т. В., Романова П. М. *Потребление сырья и энергии в черной металлургии за рубежом* // *Черная металлургия*.—1985.—№10 (980).—С.3—12
20. Stohmeier B., Lodewijks B. *The production of steel for flat products in large Ultra-high-powered furnaces* // *I.S. Afr Ins. Mining and Met.*—198.—v.8, 5.—N8.—P. 245—257
21. Егоричев А. П. *Повышение эффективности использования энергоресурсов в черной металлургии СССР* // *Сталь*.—1985.—№9.—С. 1—4
22. Miller J.R. // *Blast Furn. a Steel Plant*.—1970.—v. 58.— N6.—P.408—412
23. Schneider С.А. // *Течу то Хаганэ*.—1974.—v.60.—N5.—P. 549—556
24. Браун Д. Р., Рэдди Р. П. *Всемирный электротехнический конгресс*.—М.:Изд. Оргкомитет ВЭЛК.—1977.—секция 44.—Доклад 08.—12 с.
25. Шалимов А. Г., Каблуковский А. Ф. // *Сталь*.—1984.—№ 1.—С. 17—20
26. Чайкин Б. С., Глинков Г. М. // *Сталь*.—1984.—№ 12.—С. 11—15
27. Маринин А. В., Желинин Б. Р., Дымнич А. Х. и др. // *Сталь*.—1984.—№10.—С. 22—23
28. Ромазан И. Х., Сарычев В. Х., Бахчиев Н. Ф. и др. // *Сталь*.—1985.— № 3. С. 34—36
29. Лякишев Н. П. // *Сталь*.—1984.—№ 3.—С. 1—3
30. Максутов Р. Ф. // *Сталь*.—1984.—№ 7.—С. 15—16
31. Щелоков Я. М., Розин С. Е., Кричевцев Е. А. // *Сталь*.—1984.—№ 9.—С. 18—19

32. Баптизманский В. И., Зубарев А. Г., Коваленко Л. В. и др. // Сталь.—1984.—№ 8 с. 23—25
33. Дюдкин Д. А., Казаков А. А., Керупман Л. И., Дворяников В. А. // Сталь.—1984.—№ 6.—С. 18—19
34. Шнееров Я. А., Старов Р. В. // Сталь.—1985.—№ 5.—С. 19—22
35. Поживанов А. М., Бунеев А. Я., Рябов В. В., Климов Ю. С. // Сталь.—1985.—№ 8.—С. 20—24
36. Григорян Ю. Д., Гиттер В. М., Аронов М. А. // Сталь.—1985.—№ 3.—С. 32—34
37. Морозов А. Н. // Сталь.—1984.—№ 6.—С. 27—28
38. Кудрин В. А., Сосокин О. М., Резник И. Г. // Сталь.—1984.—№ 5.—С. 25—27
39. Корнфельд В. Н., Киржнер Д. И. // Сталь.—1984.—№ 5.—С. 87—90
40. Корнфельд В. Н., Киржнер Д. И. // Сталь.—1984.—№ 11.—С. 34—37
41. Тулучевский Ю. Н., Позднеев Н. П., Галян В. С., Курлыкин В. Н. // Сталь.—1984.—№ 6.—С. 31—33
42. Виноградов В. М., Дрожилов А. А., Чехович К. А. // Сталь.—1985.—№ 3.—С. 37—40
43. Пилушенко В. Л., Крикунов Б. П. и др. // Сталь.—1984.—№ 9.—С. 34—35
44. Жучин В. Н. // Сталь.—1985.—№ 4.—С. 10—11
45. Юзов О. В., Перлов Н. И. // Сталь.—1984.—№ 4.—С. 18—21
46. Щелоков Я. М. // Сталь.—1985.—№ 1.—С. 20
47. Кричевцев Е. А., Лалетин В. Г., Певная Э. А. и др. // Сталь.—1985.—№ 12.—С. 20—22
48. Некрасов А. П., Айзатулов Р. С., Винокуров Т. В. и др. // Сталь.—1985.—№ 7.—С. 10—11
49. Шалимов А. Г., Волков А. Е., Шалимов Ал. Г. и др. // Сталь.—1985.—№ 12.—С. 22—25
50. Афонин С. З., Косыров Л. К., Кудрин В. А. Снижение энергоемкости сталеплавильных процессов // Сталь.—1986.—№ 2.—С. 7—13
51. Sheridan A. T. // Ironmaking S Steelmaking.—1975.—v.2.—N4.—P. 262—270
52. Frost P. D., Halle R. M., Mc Leer T. I. // Iron a Steel Eng.—1979.—v.56.—N4.—P.50—56
53. Robinson C. G., Schwabe W. E. // Proc, Elekt. Furnace Steel Conf.—1964.—v.22.—P. 114—121
54. Гофман Г. В., Петкен Г. Г., Штромайн Г. Уменьшение потребления энергии в черной металлургии // Черные металлы.—1980.—№ 6.—С. 3—7
55. Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева.—М.: Энергоиздат, 1981
56. Фетт, Пфайфер Г., Зигерт Х. Энергетическое исследование дуговой печи сверхвысокой мощности // Черные металлы.—1982.—№ 9.—С. 21—26
57. Альфельд К., Шнайдер А. Влияние охлаждения на энергетические балансы дуговых сталеплавильных печей // Черные металлы.—1982.—№ 20.—С. 5—10
58. Altfeld K. Energie bilanzen an Elektfolichtbogenofen Diplomarbeit am Lehrstulbe für Wärme und Stoffübertragung.—Bochum, 1981.—(Ruhr—Univ. Bochum)

59. Розенбах К., Бруххай В. // Черные металлы.—1966.—№ 1.—С. 14—19
60. Эллиот Д. Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов / перевод с англ.—М.: Металлургия, 1969.—252 с.
61. Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей.—М.: Металлургия, 1981.—319 с.
62. Bowman V. // J four e'lec, et ind e'lectrochim.—1977.—N9.—P. 14—22
63. Смоляренко В. Д., Курлыкин В. Н., Спелицын Р. И. // Сталь.—1980.—№10.—С. 871—873
64. Hill O.K., Robinson C.G. // Iron a. Steel Eng.—1979.—v. 56.—N7.—P. 33—36
65. M.c.Manus George. Electric Furnace report: growtl that won't stop // Iron Age.—1984.—v. 227.—N1.—P.107—109, P. 113—114
66. Astier Jacques. Present situation and possible future of electric arc furnace / / Pros. Int. Symp. Mod. Dev Steelmaking, Jamshedpur, 1981.—Jamshedpur, 1981.—s.a. 493—513
67. Iverson F.K. Electric furnaces in the U.S. // Iron and Steelmaker.—1983.—v.10.—N5.—P. 44,46
68. Bianchi P., Parodi G., Rossi P., Ziveri M. Optimization de la technologie et de l'environnement du four UHP de l'usine de Campi de la Nueva Italsider // Rev. met. (Fr).—1985.—v. 82.—N8—9, P. 679—689
69. Making steel with scrap in the electric arc furnace // Phoenix Quarterby.—1985.—v. 17.—N1.—P. 8—9
70. Davene I., Edgar R.F. Conception du four a arc destine a la fusion de minerei de fer prere duit // UIE 9. 9^e Congrnt., Cannes, 20—24 oct. 1980.—Paris: Com fz electrotherm, 1980.—s.a. 16 p.ifl.—Место хранения ГПНТБ СССР.
71. Cudenan H.W., Lindner K.H., Petry lochen. Zum chargieren von eisenschvamm in den Electrolichtbog en ofen // fachber Hüttenpax Metallweiterverarb.—1984.—№ 5.—с. 87—90.—v. 22.—N7.—с. 688—691
72. Maschlanka W. The use of sponge iron in electric arc furnace // Proc. Int. Symp. Mod. Dev. Steelmaking Jamshedpur, 1981.—Jamshedpur.—s, a. 559—576
73. Fernandez Lopez M. La tecnologia de la faabricacion de acero con prerreducidos en hornes de arco II Pazte: Analisis de las diferencias entre la chatarra los prerreducidos // Rev. met. CENIM.—1984.—v. 20.—N4.—P. 253—261
74. Малютин Е. И., И. П. Бардин и отечественная металлургия.—М., 1983.—С. 54—60
75. Амелинг Д., Зиттард И., Реш В. Ремонт футеровки дуговых печей с водоохлаждаемыми стеновыми элементами // Черные металлы.—1981.—№19.—С. 13—17
76. Бредехефт Р., Хаммер Э. Э., Унгер К. Д. Реконструкция системы охлаждения дуговой электропечи фирмы Тиссен эдельшталь верке // Черные металлы.—1986.—№19.—С. 21—25
77. Шольц Р., Райнерс У. Проблемы теплопередачи при применении водоохлаждаемых элементов стен дуговых печей // Черные металлы.—1986.—№ 19.—С. 26

78. Наяель Ф. И., Гириг Х. Система охлаждения дуговой печи на э-де фирмы Тиссен Ниддеррейн в оберхаузене // Черные металлы.—1984.—№3.—С. 10
79. Смоляренко В. Д., Пирогов Н. А. и др. Совершенствование работы дуговых сталеплавильных печей за рубежом // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической информации.—1986.—выпуск 5 (1009).—С. 2—11
80. Kogel Kurt, Wilhelm Herbert, Zöllner Dieter Kühlung von Lichtbogenelektroden // Stahl und Eisen.—1983.—103.—N18.—P.63-68, 139—141
81. Унгер К. Д., Бауер Г., Мюленбек И., Цельнер Д. Результаты использования водоохлаждаемых комбинированных электродов в дуговой печи // Черные металлы.—1984.—№ 1 С. 6—9
82. Veronesi F., Trupiano A., Paugo G. Technological experiences and Operational objects achieved with 110/140 t electric arc, furnace at D.E.L Falck-Unions Steelworks in sesto s Giovanni after its revamping // Proceedings at the 1-st European electric steel Congress.—1983.—September.—Aachen
83. Isenberg J. The new cadence at Union Carbide // 33 Metal Producing.—1984.—N7.—P. 52—55
84. Mc Manus Y. Growth that won't stop // Iron Age.—1984.—N227.—P. 107—110, 113, 114, 117, 119.
85. Rodal D. operating experience with taphola slidegate valke on electric arc furnace // Proceedings of the 1-st European electric steel Congress.—1983.—September.—Aachen
86. Strohmeier B., Lodewijk B. Production of steel for Hat products in large UHP arc furnaces at ISCOR LTD // Proceedings of the 1-st European electric steel Congress.—1983.—September.—Aachen
87. საპატენტო განაცხადი 60-184621 (იაპონია) განცხადებულისა 01.03.84. №59—37294. გამოქვეყნებულია 20.09.85. MKH C 21 c 7/076.
88. Dc arc furnace in full production at Feeuch mini mill // Steel Times.—1986.—v. 214.—N4.—P. 204—205
89. Ligot G. A., Salomon P. Y. La quatrieme generation des fours a arc dacérie // I four. élec.—1983.—v. 88.—N1.—P. 13—19
90. Bauer H., Iunkep A., Otto Y., Thyssen Edelstahlwerk AG Witten. New electric steel plan concept at Thyssen Edelstahlwerke AG, Witten // Facuber, Gierntenarax, Metallweiter-weiarb.—1982.—v. 20.—N4.—P. 276—278, 280, 282—285
91. Fettweis W, Naugia R, Klingelhöfer H. Y. Conversion of a conventional melt shop into a modern high speed steelmaking facility // Fachber Müttenpax Metallweiterverarb.—1984.—v. 22.—N10.—P. 949—951, 954—956
92. Baare Rolf-Dieter, Overgard Yorgen, Rosmussen Eivind An eccentric bottom tapping System 18- months experience // Iron and Steel Eng.—1984.—v. 61.—N7.—P. 27—32
93. Vallomy John A. Method for continuous steelmaking // Intersteel Technology Ins.

94. Vallomy John A. Continuous electric furnace steelmaking – The CONSTEEL process // Iron and Steel Eng.–1985.–v. 62.–N11.–P. 44–47
95. Continuous EAF process developed by Intersteel Technology // Steel Times.–1985.–v. 213.–N10.–P. 490
96. EAF process // Iron Age.–1985.–v.228.–N11.–P. 76
97. Способ ремонта футеровки доменной печи / Ноги Кенго, Утияма Юдзи, Эсаси Тосиро, Миками Сосиро.– Сипиниппон СЭИЦУ К. К.
98. Ghobarah A. Optimization of electric furnace operation // VI Elec. Furn. conf. Proc., Detroit Meet, 6–9 Dec., 1983.–Wattendale, Pa.–1984.–vol 41.–P. 105–109
99. Minimills and the prosperity of steel // Compress Air.–1985.–v. 90.–N1.–10–14
100. Кумачая Месехито, Утимура Иосихару, Ватанбе Сэйдзи Метод восстановления огнеупорной стенки вокруг фурмы конвертера.–Кавасаки сейтецу к. к.
101. Maschlanka Walter Ein neues konzept für ein enehgic und kostespareudes Ministahlwerk // Fachber. Hüttenpzhax Metallwesterwerarb.–1984.–v. 22.–N10.–P. 969–974
102. Мизин В. Г., Галян В. С. Техническое перевооружение электросталеплавильных цехов с печами емкостью 100-200 т // Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей.–М., 1983.–С. 7–9
103. Ввод в эксплуатацию 110-т дуговой печи // Черные металлы.–1981.–№9.–С. 18
104. Смоляренко В. Д., Пирогов Н. А., Давыдов В. П. Совершенствование работы дуговых сталеплавильных печей за рубежом // Черная металлургия (Бюллетень научно-технической информации).–1966. № 5 (1009).–С.2–13
105. Внепечная обработка металла в конверторных печах Новолипецкого металлургического Комбината / Поживанов Л. М., Климашин П. С., Новиков В. Н. и др. // Черная металлургия (Бюлл. ин-та Черметинформация).–1985.–№19.–С. 9–30
106. Davies I. Y., Morgan P. C. Secondary-steelmaking developments on engineering steels at Stochsbridge Works BSC // Ironmaking and Steelmaking.–1985.–v. 12.–N4.–P. 176–184
107. Wilhelm M. The use of a ladle reviner in conjunction with an electric furnace // Ironmaking and Steelmaking.–1985.–v. 12.–N7.–P. 24–30
108. Холсида С., Гакоми Т., Само И. Технология выплавки низколегированных сталей процессом „Дуговая печь–ковш–печь–вакуумирование“ // Тецу то ХАГАНЭ.–1982.–№2.–С. 49–51
109. Ямада К., Ямадзакэ Ц. и др. Производство специальных сталей мелкими партиями в кислородных конверторах с использованием установок „ковш–печь“ // Тецу то ХАГАНЭ.–1982.–№4.–С. 252

110. Miywaki, Shirotans and Usui. Development of a New Ladle Refining Process "NKK-Arc Process" // Nippon Kokan-Technical Report Overseas.-1983.-N39
111. Tagnchi T., Tachibana K., Ogura Y. Application of secondary steelmaking to seamless steel tube production in NKK // Iron-making and steel making.-1985.-v. 12.-N4.-P. 185-191
112. საპატენტო განაცხადი 59-232213 (იაპონია);
113. PM Process for ladle refining // Steel Times.-1984.-v. 212.-N10.-P. 469.-Pulsating for reduced costs-Iron and Steel International.-1984.-v. 57.-N5.-P. 156-157
114. საპატენტო განაცხადი 59-190312 (იაპონია);
115. პატენტი 4541866 (აშშ);
116. Verschueren P., Paridaens S. Pure Calcium in Ladle Metallurgy - the Immersion Method Ca-Fe-LOG-Clean Steel 3 // Third International Conference, 2-4 June 1986, Balatonfüred, Hungary.-1986.-p. 101-104
117. საქართველოს პატენტი P 2767

VII . განყოფილებისათვის

1. Пазухин В. А., Фишер А. Я. Вакуум в металлургии.-М.:Металлургия, 1956.-520 с.
2. Линчевский Б. В. Вакуумная металлургия стали и сплавов.-М.:Металлургия, 1970.-258 с.
3. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Рысс М. А., Строганов А. И., Ярцев М. А.-М.:Металлургия, 1974.-550 с.
4. Крамаров А. Д., Соколов А. Н. Электрометаллургия стали и ферросплавов.-М.:Металлургия, 1976.-376 с.
5. Фарнасов А. Н., Фридман А. Г., Каринский В. Н. Плазменная плавка.-М.:Металлургия, 1968.-180 с.
6. Краснов А. Н., Зильберберг В. Г., Шаривкер С. Ю. Низкотемпературная плазма в металлургии.-М.:Металлургия, 1970.-216 с.

VIII და IX განყოფილებებისათვის

1. Металлургия стали / В. И. Явойский, С. Л. Левин, В. И. Баптизманский, П. В. Умрихин, М. Я. Меджибожский, Д. Я. Поволоцкий, Г. Н. Ойкс, М. А. Черненко, Е. В. Абросимов.-М.: Металлургия, 1973.-816 с.
2. Кудрин В. А. Металлургия стали.-М.: Металлургия, 1989.-560 с.

3. Обработка металла инертными газами / Г. Н. Ойск, А. В. Степанов, П. И. Мелихов, А. П. Баяринова, В. С. Култыгин, Л. К. Косырев, Л. В. Виноградова.—М.: Металлургия, 1969ю—112 с.
4. Яблонский В. С. Краткий курс технической гидромеханики.—М.: Гос. изд.-во. физ.-мат. литературы, 1961.—356 с.
5. Войнов С. Г., Шалимов А. Г., Косой А. Ф. Рафинирование стали синтетическими шлаками.—М.: Металлургия, 1970.—352 с.
6. Баканов К. П., Бормотин И. П. и др. Рафинирование стали инертным газом.—М.: Металлургия, 1975.—232 с.
7. Сидоренко М. Ф. Теория и практика продувки металла порошками.—М.: Металлургия», 1978.—232 с.
8. Соколов Г. А.. Внечечное рафинирование стали.—М.:Металлургия, 1977.—208 с.
9. Инжекционная металлургия.—Труды конференции.—Лелеа.—Швеция. 1977, 1980, 1986. 1989. / пер. с англ.—М.: Металлургия
10. Смирнов А. А., Кудрин В. А. Рафинирование стали продувкой порошками в печи и ковше.—М.: Металлургия, 1986.—764 с.
11. Трубин К. Г., Ойск Г. Н. Металлургия стали.—М.: Металлургия, 1951.—764 с.
12. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали.—М.: Металлургия, 1976.—552 с.

XI განყოფილებისათვის

1. А. с. 582299 СССР. Способ обработки жидкого металла / Кашакашвили Г. В., Голубев А. А., Гладышев Н. Г., Поляков В. Б., Суладзе О. Н.—1977
2. А.с. 701151 СССР, МКИ С21 С 5/04. Способ выплавки стали / Кашакашвили Г. В., Суладзе О. Н., Миндели М. Ш., Нозадзе А. Д. Руставский металлургический завод.—№2596785/22-02; Заяв. 29.03.78.—1979
3. Рафинирование стали синтетическими шлаками в промежуточном ковше МНЛЗ / Кашакашвили Г. В., Булгаков В. П., Шарадзендзе А. С., Ганкин В. Б. // Сталь.—1979.—№ 3
4. Продувка стали инертными газами через разливочное отверстие шиберного затвора в ковше / Кашакашвили Г. В., Ланчава М. Д., Габисиани А. Г., Шатиришвили Т. А., Мумладзе М. В. // Сталь.—1986.—№ 3
5. А. с. 1232371 СССР. Шиберный затвор / Кашакашвили Г. В., Ланчава М. Д., Габисиани А. Г., Моснашвили В. В., Бакурадзе А. И.—1986
6. Образование оксидных включений при раскислении железа кальций- и барийсодержащими сплавами / Кашакашвили Г. В., Габисиани А. Г., Маргиев Б. Г., Аверин В. В. И др. // Сталь. 1987.—№ 1
7. А. с. 1268615 СССР. Способ продувки жидкого металла / Кашакашвили Г. В., Шатиришвили Т. А., Гвамбериа Н. О., Девдарнани С. П. и др.—1988

8. А. с. 1410541 СССР. Способ обработки металла / Кашакашвили Г. В., Габисиани А. Г., Ланчава М. Д., Шатиришвили Т. А.–1988.–(Патент–31.01.92)
9. А. с. 1740937 СССР. Пневмонасос для вдувания порошкообразных материалов в жидкий металл / Кашакашвили Г. В., Кекелиа Г. А., Мумладзе М. В., Шатиришвили Т. А. и др.–1988
10. ШОС-процесс на Руставском металлургическом заводе / Кашакашвили Г. В., Ланчава М. Д., Габисиани А. Г., Гвамбериа Н. О., Кекелиа Г. А. // Сталь.–1988.–№ 10
11. А. с. 1740432 СССР. Способ внепечной обработки жидкой стали / Кашакашвили Г. В., Гвамбериа Н. О., Шатиришвили Т. А., Мумладзе М. В. и др.–1990
12. А. с. 1888501 СССР. Ковш для продувки через шиберный затвор / Кашакашвили Г. В., Агарышев А. И., Бахчиев Н. Ф. и др.–1990
13. Кашакашвили Г. В., Жордания И. С., Булгаков В. П. Исследование процессов деформации трубной заготовки при непрерывной разливке на радиальной машине.–М.:Эвтектика, 1993.–280с.
14. Kashakashvili G. V., Zhordania I. S., Bulgakov V. P. An investigation of the strain processes of round billets at continuous casting in radial machine.–London:Minerva press, 1997
15. Kashakashvili G. V., Gabisiani A. G., Kashakashvili B. G. Development of the Complex Technology of out of furnace processing for seamless tubes // The V International symposium for desulfurization of hot metal and steel. October 15-17, 1998, Piding, Bad Reichenhall, Germany/Almamet, Remacor, Magnesium elektron.–1998.–P. 61-65
16. Кашакашвили Г., Габисиани А., Кашакашвили Б. Разработка и внедрение приоритетных процессов ковшевой металлургии на основе инъекционной обработки стали через шиберный затвор // Труды 5-го международного симпозиума по десульфурации жидкого чугуна и стали Пидинг, Бад Рейхенхал, Федеративная Республика Германии 15-17 октября 1998 г. / Алмамет, Ремакор, Магнезиум электрон.–1998.–С.26–35
17. საქართველოს პატენტის P 2767
18. Ехельманер А., Хорнберг Х. Вдувание через шиберную систему (Slide Gate) // Установки для ввода десульфураторов чугуна и различных добавок: Труды VII Международного симпозиума десульфурации чугуна и стали г. Аниф, Австрия, 26-27 сентября 2002 г / Фирма „Алмамет“.–2002. С. 42–52
19. Steel Times International.–2001.–№2.–P. 36.–(December-January)
20. Галкин М. П., Никитин Г. С. Ресурсосберегающие литейно-прокатные агрегаты // Металлургия машиностроения.–2002.–№1(4).–С. 32-36

წინასიტყვაობა	5
I ბანყოფილება	7
თავი I. ზოგადი ნაწილი	7
1.1.1. რკინისა და მისი შენადნობების როლი კაცობრიობის განვითარების ისტორიაში	7
1.1.2. ფოლადის წარმოების განვითარების ისტორია	9
1.1.3. თუჯის ფოლადად გადამუშავების არსი	14
1.1.4. ფოლადის წარმოების ხერხების კლასიფიკაცია	15
თავი II. რკინის პირდაპირი მიღების ხერხები	16
1.2.1. მეტალურგიის განვითარების ძირითადი ეტაპები უძველესი დროიდან დღემდე	16
1.2.2. რკინის წარმოება ძველ საქართველოში	23
1.2.3. რკინის ცივბერვითი ხერხით მიღება სხვა ქვეყნებში	28
1.2.4. შენადნული რკინის წარმოება გუნდური ხერხით	33
1.2.5. შენადნული რკინის წარმოება პუდლინგის ხერხით	35
1.2.6. შენადნული რკინის წარმოება ასტონ-ბაიერსის ხერხით	38
1.2.7. ფოლადის წარმოების ქოთნური ხერხი	40
1.2.8. ღრუბლოვანი რკინის წარმოება	42
1.2.9. რკინის მიღება ელექტროლიზით	44
1.2.10. მეტალურგიის მეცნიერების საფუძველი და მისი განვითარება	45
II ბანყოფილება. ფოლადსადნობი პროცესების ძირითადი თეორიული საფუძვლები	53
თავი I. ქიმიური თერმოდინამიკის საფუძვლები	53
2.1.1. თერმოდინამიკის განსაზღვრა და ტერმინოლოგია. ძირითადი ცნებები	53
2.1.2. თერმოდინამიკის პირველი კანონი	57
2.1.3. სითბური ეფექტი	58
2.1.4. თერმოდინამიკის მეორე კანონი	64
2.1.5. ქიმიური რეაქციის გიბსის ენერგია	67
2.1.6. რეაქციის წონასწორობის მუდმივა	69
2.1.7. ქიმიური რეაქციის იზოთერმისა და იზობარის განტოლებები	74
2.1.8. ქიმიური სწრაფვა. ქიმიური რეაქციის წონასწორობის გაანგარიშება	75

2.1.9 ხსნარები. შედგენილობა. თერმოდინამიკური ფუნქციები	78
2.1.10 რაულისა და პენრის კანონები	84
2.1.11 სრულყოფილი ხსნარები	86
2.1.12 იდეალური განზავებული ხსნარები	87
2.1.13 აქტიურობა	89
2.1.14 რეალური ხსნარები	94
2.1.15 ერთი სახის სტანდარტული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა	96
2.1.16 რეგულარული ხსნარები	97
2.1.17 ურთიერთქმედების პარამეტრები	101
2.1.18 ხსნარების მონაწილეობით მიმდინარე რეაქციების წონასწორობის ანგარიში	106
თავი II. ფოლადსადნობი წარმოების წიდეები	111
2.2.1. წიდეების ტექნოლოგიური ფუნქციები და მახასიათებლები	112
2.2.2. წიდეების მოლეკულური თეორია	114
2.2.3. სრულყოფილი იონური ხსნარების თეორია	117
2.2.4. რეგულარული იონური ხსნარების თეორია	119
თავი III. ელემენტების თერმოდინამიკა რკინის ნაღვლებში ..	122
2.3.1. ნახშირბადის ხსნადობა	122
2.3.2. ნახშირბადის და ჟანგბადის ურთიერთქმედება რკინის ნაღვლებში	123
2.3.3. გოგირდი ნაღვლებში	125
2.3.4. გოგირდის ურთიერთქმედება წიდასთან	126
2.3.5. გოგირდის ურთიერთქმედება აირად ფაზასთან	131
2.3.6. გოგირდის ურთიერთქმედება სულფიდწარმოქმნელ ელემენტებთან	133
2.3.7. ფოსფორი ნაღვლებში	134
თავი IV. ფოლადის განჟანგვა და ლეგირება	136
2.4.1. ფოლადის განჟანგვის აუცილებლობა	136
2.4.2. ჟანგბადის ხსნადობა რკინაში	137
2.4.3. ფოლადის განჟანგვა ლექვითი მეთოდით	139
2.4.4. განჟანგვა მანგანუმით	143
2.4.5. სილიციუმით განჟანგვა	144
2.4.6. ალუმინით განჟანგვა	145
2.4.7. ტიტანით განჟანგვა	146
2.4.8. ცირკონიუმით განჟანგვა	147
2.4.9. ცერიუმით განჟანგვა	147
2.4.10. კალციუმითა და ბარიუმით განჟანგვა	148

2.4.11. კომპლექსური განმჯანგველებით განუანგვა	149
2.4.12. ფოლადის დიფუზიური განუანგვა	150
2.4.13. ვაკუუმური განუანგვა	152
2.4.14. ფოლადის ლეგირება	154
თავი V. აირები და არაალითონური ჩანართები ლითონში	156
2.5.1. აირების ხსნადობა ლითონში	156
2.5.2. ფოლადში აირების შემოსვლის წყაროები და აირების მოშორება	162
2.5.3. არაალითონური ჩანართების წარმოქმნა და ფოლადიდან მოშორება	165
2.5.4. ფოლადიდან არაალითონური ჩანართების მოშორების მექანიზმი	171
2.5.5. აირებისა და არაალითონური ჩანართების გავლენა ფოლადის თვისებებზე	174
III ბანჯოშილება	177
თავი I. ფოლადის წარმოების კონვერტერული ხერხები	177
3.1.1. ბესემერის პროცესის აღმოცენება და განვითარება	177
3.1.2. ბესემერის კონვერტერის მოწყობილობა	178
3.1.3. ფოლადის დნობა ბესემერის პროცესში	181
3.1.4. ლითონზე გაქრევის მოქმედების მექანიზმი და ჰიდროდინამიკა	185
3.1.5. ბესემერის პროცესის სითბური მხარე	189
3.1.6. ბესემერის პროცესის ვარიანტები	192
3.1.7. მცირე ბესემერება	193
3.1.8. თომასის პროცესი	196
3.1.9. თომასის პროცესის ტექნოლოგია	198
3.1.10. კონვერტერული პროცესი რკინის მადნისა და კირქვის გამოყენებით	201
3.1.11. გვერდითი შებერვა და შებერვა დახრილ მდგომარეობაში მყოფ კონვერტერში	203
3.1.12. ბესემერისა და თომასის კონვერტერებში გამოდნობილი ფოლადების თვისებები და გამოყენება	207
თავი II. უანგბად-კონვერტერული პროცესი	209
3.2.1. უანგბად-კონვერტერული პროცესის აღმოცენება	209
3.2.2. უანგბადის გამოყენება ქვემოდან შებერვით მომუშავე კონვერტერებში	210

3.2.3. ნახშირორჟანგის ან წყლის ორთქლისა და ჟანგბადის ნარევის გამოყენება შებერვისას.....	212
3.2.4. ჟანგბად-კონვერტერის კონსტრუქცია და ქშინის ანგარიშის მეთოდისა	216
3.2.5. ქშინის ანგარიში	221
3.2.6. ჟანგბადის ჭაელის აეროდინამიკა	224
3.2.7. ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი ზედა შებენით	228
3.2.8 მალალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავება ზედა გაქრევით მომუშავე კონვერტერებში ნაჭროვანი კირის გამოყენებით	233
3.2.9 მალალფოსფორიანი თუჯების გადამუშავება ზედა გაქრევით მომუშავე კონვერტერებში ფხენილოვანი კირის გამოყენებით	234
3.2.10. „კალდო-პროცესი“	236
3.2.11. როტორული პროცესი	238
3.2.12 ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი ქვემოდან შებენით	241
3.2.13 ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ტექნოლოგია ნაჭროვანი კირის გამოყენებით	245
3.2.14. ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის ტექნოლოგია ფხენილოვანი კირის გამოყენებით	246
3.2.15 ქვემოდან შებერვითი ჟანგბად-კონვერტერული პროცესის დადებითი და ნაკლოვანი მხარეები	247
3.2.16. ჟანგბად-კონვერტერული პროცესი კომბინირებული გაქრევით	249
3.2.17. ჟანგბადით გაქრევა ზემოდან და ქვემოდან	250
3.2.18 ჟანგბადის გაქრევა ზემოდან და ინერტული აირებისა – ქვემოდან	252
3.2.19. ვანადიუმის თუჯების გადამუშავება კონვერტერში	254
3.2.20. ქრომისა და ნიკელის შემცველი თუჯის გადამუშავება	256
3.2.21. მალალმანგანუმის თუჯების გაქრევა	257

IV ბანყოფილება. მარტენისა და სხვა პროცესები	260
თავი I. მარტენის პროცესში გამოყენებული მასალები	260
4.1.1. საკაზმე მასალები	260

4.1.2.	ფეროშენადნობები	261
4.1.3.	მეტალიზებული ნედლეული	263
4.1.4.	დამჟანგველები	263
4.1.5.	დამატებითი მასალები	266
4.1.6.	კარბიურიზატორები	268
4.1.7.	სათბობი	268
4.1.8.	ცეცხლგამძლე მასალები	270
თავი II.	ფოლადის წარმოება მარტენის პროცესით	271
4.2.1.	მარტენის პროცესის აღმოცენება და განვითარება	271
4.2.2.	მარტენის ღუმელის კონსტრუქცია და მუშაობის პრინციპი	273
4.2.3.	მარტენის პროცესის ზოგადი დახასიათება	280
4.2.4.	მარტენის პროცესის სახესხვაობები	283
4.2.5.	მარტენის პროცესის ტექნოლოგიური და სითბური რეჟიმების სინქრონიზაცია	288
4.2.6.	მუავე მარტენის პროცესი	293
4.2.7.	კაზმის შედგენილობა, ჩატვირთვის რიგი და წილის წარმოქმნა	296
4.2.8.	მინარეკების ქანგვა-აღდგენის რეაქციები კაზმის გადნობის შემდეგ	298
4.2.9.	აირები და არალითონური ჩანართები მუავე ფოლადში	301
4.2.10.	დნობის პრაქტიკა მუავე ღუმელში	304
თავი III.	ფოლადის დნობის სხვა პროცესები	305
4.3.1.	ფოლადის წარმოება ორაბაზანიან ფოლადსადნობ ღუმელში	305
4.3.2.	ფოლადის წარმოების უწყვეტი ხერხები	308
4.3.3.	ფოლადის წარმოება ხერხით „მადანი-ფოლადი“	312
V	ბანყოშილება	316
თავი I.	ელექტროფოლადსადნობი ღუმელები	316
5.1.1.	ელექტროფოლადსადნობი ღუმელების კლასიფიკაცია და დანიშნულება	317
5.1.2.	ელექტრული რკალი	325
5.1.3.	რკალური ფოლადსადნობი ღუმელების სამუშაო სივრცე	331
5.1.4.	თბოგადაცემა რკალური ღუმელის სამუშაო სივრცეში	331

5.1.5. ღუმელის სამუშაო სივრცის ზომები.....	336
თავე II. რკალური ღუმელების ამონაგი	344
5.2.1. რკალური ღუმელების ამონაგის მუშაობის თავესებურებანი	344
5.2.2. ცეცხლგამძლე მასალები	346
5.2.3 რკალური ღუმელის ამოგება	348
თავე III. მექანიკური მოწყობილობა	352
5.3.1. რკალური ღუმელის მექანიკური მოწყობილობა	352
5.3.2. ღუმელის გარსაცმი და კამარის რგოლი	353
5.3.3. საყრდენი კონსტრუქციები	356
5.3.4. ღუმელის გადახრის და შემობრუნების მექანიზმები	358
5.3.5. სამუშაო ფანჯრები	361
5.3.6. ელექტროდის დამკერები და მათი გადაზადგილებელი მექანიზმები	362
5.3.7. ელექტროდებისათვის კამარაში განკუთვნილი შემამჭიდროებელი რგოლები	366
5.3.8. ღუმელების კამარის ასახდელი მოწყობილობები კაზმის ზემოდან ჩატვირთვისათვის	369
5.3.9. აირებისა და მტვრის გამწოვი მექანიზმები	370
თავე IV. ელექტრული მოწყობილობა	370
თავე V. ელექტროდები	374
თავე VI. ღუმელის მუშაობის ოპტიმალური რეჟიმის შერჩევა	378
5.6.1. თხევადი ლითონის ელექტრომაგნიტური ამრევის მოწყობილობა	380
VI ბანჟოშილიბა. ფოლადის დნობის ტექნოლოგია ღია ელექტრორკალურ ღუმელებში	382
თავე I. ფუძე და მუავე ელექტრორკალურ ღუმელებში ფოლადის დნობის ტექნოლოგიის საფუძველები	382
6.1.1. დნობის ხერხები რკალურ ღუმელებში	383
თავე II. საკაზმე მასალები	385
თავე III. საკაზმე მასალების მომზადება დნობისათვის	393
თავე IV. ღუმელის მომზადება და გაწყობა დნობისათვის	394
თავე V. კაზმის ჩატვირთვა	397
თავე VI. კაზმის გადნობა	399
თავე VII. დაჯანგვის პერიოდი	402
თავე VIII. განჯანგვა. აღდგენითი პერიოდი	407
თავე IX. ერთი წილის ქვეშ დნობის ტექნოლოგია	416

თავი X. ალდგენითი პერიოდის შემცირების ხერხები	417
თავი XI. ლითონის დამუშავება ციცხეში სინთეზური წილებით	417
თავი XII. ფხენილისებრი მასალების გამოყენება	418
თავი XIII. ღნობის თავისებურებანი მჟავეამონაგვიან ღუმელებში	420
VII ბანძ(ო)შილება. სპეციალური ელექტრომეტალურგია	427
თავი I. ფოლადის და შენადნობების ვაკუუმური მეტალურგია	427
7.1. მეტალურგიული დანადგარების ვაკუუმური სისტემების გამოთვლის ხერხები	429
7.1.1. ვაკუუმური სისტემები	429
7.1.2. მეტალურგიული დანადგარების ვაკუუმური სისტემების გაანგარიშების მეთოდი	431
7.1.3. გამოყოფილი აირების რაოდენობის განსაზღვრა	431
7.1.4. აირის გამოყოფა თხევადი ლითონიდან	431
7.1.5. ლითონკონსტრუქციების ზედაპირიდან დესორბირებული აირების რაოდენობა	433
7.1.6. ცვეხლგამძლე მასალებიდან გამოყოფილი აირები	434
7.1.7. არასიმჭიდროვეებიდან შეღწეული აირების რაოდენობა	435
7.1.8. აუცილებლად ამოსატუმბი აირების რაოდენობის გამოთვლა	435
თავი II. ვაკუუმური ტუმბოები	436
7.2.1. მრავალფირფიტიანი ტუმბოები	436
7.2.2. ფირფიტა-როტორული ტუმბოები	437
7.2.3. ყვინთა ტუმბოები	438
7.2.4. ორროტორიანი ტუმბოები	439
7.2.5. ორთქლჭაველური ტუმბოები	439
თავი III. ვაკუუმური მეტალურგიის პროცესების ფიზიკურ-ქიმიური საფუძვლები	440
7.3.1. ლითონის დახალასება (რაფინირება) ჟანგბადისაგან	441
7.3.1.1. ლითონის განჟანგვა ნახშირბადით	441
7.3.1.2. ლითონის განჟანგვა წყალბადით	444
7.3.1.3. განჟანგვა ლითონური განმჟანგველებით	445
7.3.2. არალითონური წანართების აღდგენა ვაკუუმში	446
7.3.2.1. MnO-ს მინარევების აღდგენა	446

7.3.2.2. კაემიწის (SiO_2) ჩანართების აღდგენა	448
7.3.2.3. ქრომის ჟანგის (Cr_2O_3) აღდგენა	448
7.3.3. თხევადი ლითონისა და ცეცხლგამძლე მასალების ურთიერთქმედება ვაკუუმში	450
7.3.4. ლითონის დეგაზაცია	451
7.3.4.1. ჟანგბადის მოშორება	451
7.3.4.2. წყალბადისა და აზოტის მოცილება	452
7.3.5. განგოგირდება (დესულფურაცია) ვაკუუმში	454
7.3.6. თხევადი ლითონიდან კომპონენტების აორთქლება	456
თავი IV. დნობა ვაკუუმურ დანადგარებში	458
7.4.1. დნობა ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში	458
7.4.1.1. ვაკუუმურ-ინდუქციური სამრეწველო ღუმელები	460
7.4.1.2. ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელების ელექტროკვება	462
7.4.1.3. ვაკუუმურ-ინდუქციური ღუმელების ცეცხლგამძლე ტიგელები	464
7.4.1.4. ვაკუუმურ-ინდუქციურ ღუმელებში დნობის ტექნოლოგია	466
7.4.2. ვაკუუმურ-რკალური გადადნობა	470
7.4.2.1 ვაკუუმურ-რკალური ღუმელი სახარჯი ელექტროდით	473
7.4.2.2. ვაკუუმურ-რკალური ღუმელების რეგულირება	478
7.4.2.3. ვაკუუმური სამფაზა რკალური ღუმელები	481
7.4.2.4. ვაკუუმურ-რკალური გარნისაუული ღუმელი	482
7.4.2.5. სხმულის კრისტალიზაცია ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელში	483
7.4.2.6. ლიკვაცია სხმულებში ვაკუუმ-რკალური გადადნობისას	485
7.4.2.7. ვაკუუმურ-რკალურ ღუმელში დნობის პირობების გაველენა სხმულის ზედაპირის ხარისხზე	486
7.4.2.8. არალითონური ჩანართების მოშორება ვაკუუმურ-რკალური გადადნობისას	487
თავი V. ლითონების ელექტრონულ-სხივური დნობა	489
7.5.1. ვაკუუმური დნობის სხვადასხვა მეთოდის შეფასება	489
7.5.2. ელექტრონებით გახურების პრინციპი	493
7.5.3. ელექტრონულ-სხივური სადნობი ღუმელის ძირითადი ელემენტები	496

7.5.4. ელექტრონულ-სხივური სადნობი დანადგარების კონსტრუქციები	499
7.5.5. გასადნობელექტროდიანი დანადგარები	499
7.5.6. ელექტრონულ-სხივური დანადგარები არაგასადნობი ანოდით	501
7.5.7. ელექტრონულ-სხივური სადნობი საწარმოო ღუმელები	502
თავი VI. პლაზმურ-რკალური დნობა	503
7.6.1. დაბალტემპერატურული პლაზმის ფიზიკური ბუნება	503
7.6.2. დაბალტემპერატურული პლაზმის მიღების ხერხები	507
7.6.3. რკალი და რკალური პლაზმა	509
7.6.4. რკალური განმუხტვის ძირითადი ენერგეტიკული უბნები	509
7.6.5. ენერგიის განაწილება რკალური განმუხტვის უბნებს შორის	510
7.6.6. პლაზმური (შეკუმშული) რკალი	511
7.6.7. პლაზმურ-რკალური ღუმელები	511
7.6.8. დაბალი წნევის პლაზმურ-რკალური ღუმელები	512
7.6.9. პლაზმურ-რკალური გადადნობის პროცესის ტექნოლოგიური სქემა	513
7.6.10. პლაზმურ-რკალური გადადნობის პროცესი	515
7.6.11. თხევადი ლითონის აბაზანა პლაზმურ-რკალური გადადნობისას	516
7.6.12. პლაზმურ-რკალური გადადნობის სხმული	519
7.6.13. პლაზმურ-რკალური დნობის პროცესში ელექტროდზე და აბაზანაში მიმდინარე რეაქციების კინეტიკა და თერმოდინამიკა	520
7.6.14. პლაზმურ-რკალური დნობის საწყისი კინეტიკური განტოლებანი	523
7.6.14.1. რეაქციები, რომლებიც იზღუდება რეაგენტების გადაადგილებით ლითონურ ფაზაში	523
7.6.14.2. რეაქციები, რომლებიც იზღუდება აიროვანი ან წილური ფაზიდან რეაგენტის გამოტანით	525
7.6.14.3. მასის გადატანა ჰეტეროგენული რეაქციებისას	526
7.6.15. ლითონის დახალასება პლაზმურ-რკალური დნობისას	527

7.6.16. დახალასება მინარევების მექანიკური მოშორებით ნეიტრალურ არეში დნობისას	527
7.6.16.1. არალითონური ჩანართების მოცილების მექანიზმი გადადნობითი პროცესებისას	527
7.6.17. ელექტროდისა და აბაზანის პერიოდების მნიშვნელობა ჩანართების მოშორების პროცესში	529
7.6.18. ჩანართების გამოყოფა ხსნარიდან ლითონის კრისტალიზაციისას	529
თავი VII. ელექტროწიდური გადადნობა	530
7.7. ელექტროწიდური გადადნობა	530
7.7.1. ელექტროწიდური გადადნობის ტექნოლოგია	534
7.7.2. ლითონის ხარისხი და ევგ-ს გამოყენების არე	536
VIII ბანქ(უ)შილქა. ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავება	537
8.1. ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების აუცილებლობა	537
8.2. ფოლადსადნობი აგრეგატიდან ფოლადის გამოშვების დროს მიმდინარე ჰიდროდინამიკური, ქიმიური და სითბური პროცესები	538
8.3. ფოლადის გაქრევა ციცხეში ინერტული აირებით	543
8.4. ციცხეში ფოლადის გაქრევის ჰიდროდინამიკა	546
8.5. ფოლადის დამუშავება ციცხეში სინთეზური წიდებით და ფხენილოვანი რეაგენტებით	549
8.6. ფოლადის ვაკუუმური დამუშავება ციცხეში და მისი სახეები	553
8.7. ჟანგბად-არგონის ნარევით გაქრევა	557
8.8. ციცხე-ღუმელი	558
8.9. ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების კომპლექსური ტექნოლოგია	560
IX ბანქ(უ)შილქა. ფოლადის ჩამოსხმა და ფოლადის ზოდის კრისტალიზაცია (დაკრისტალევა)	561
9.1. ფოლადის ჩამოსხმისათვის საჭირო მოწყობილობა	561
9.2. ფოლადის ჩამოსხმის სახეები, მათი დადებითი და ნაკლოვანი მხარეები	569
9.3. ფოლადის ჩამოსხმის ტექნოლოგია	571
9.4. ფოლადის ზოდის კრისტალიზაცია ანუ დაკრისტალევა	574

9.5. მშვიდი ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა	578
9.6. მდუღარე ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა	584
9.7. ნახევრად მშვიდი ფოლადის ზოდის აგებულება და მის დეფექტებთან ბრძოლა	587
9.8. ფოლადის უწყვეტი ჩამოსხმა	590
9.9. ფოლადის უწყვეტად ჩამოსხმული ზოდის აგებულება და დეფექტები	594
X ბანჟი (ოქილება). ზემოქალი დუმილები	596
თავი I. ფოლადის თანამედროვე წარმოება ელექტროკალურ დუმილებში	596
10.1.1. ელექტროფოლადსადნობი წარმოების განვითარების ტექნიკურ-ეკონომიკური საფუძვლები	596
10.1.2. სასაქონლო ჯართი	599
10.1.3. საკუთარი ჯართი	601
10.1.4. ელექტროფოლადის წარმოების მოცულობის პროგნოზირება	602
10.1.5. ელექტროფოლადსადნობი წარმოების ეფექტურობა ..	607
10.1.6. შავი ლითონების წარმოების ეკონომიკა საბაზრო პირობებში და ცენტრალიზებული მართვისას	609
10.1.7. ფოლადის წარმოების პროცესების შედარებითი ენერგოტევადობა	615
თავი II. ზემოქალი რკალური დუმილები	617
10.2.1. ზემოქალი რკალური დუმილების ენერგეტიკული ბალანსი და ენერჯის ხარჯი	619
10.2.1.1. მატერიალური ბალანსი	624
10.2.1.2. ენერგეტიკული ბალანსი	626
10.2.1.3. ექსერგეტიკული ბალანსი	628
10.2.1.4. მარგი ქმედების კოეფიციენტის განსაზღვრა	635
10.2.1.5. სითბო, რომელიც მიაქვს დუმილის კედლის ელემენტებს	642
10.2.2. ზემოქალი რკალური დუმილების განვითარების საფუძვლები	656
10.2.2.1. ზემოქალი რკალური დუმილების თანამედროვე მდგომარეობა და მათი განვითარების მიმართულებები	659
10.2.2.2. თანამედროვე ზემოქალი რკალური დუმილები	660

თავი III. მცირე ქარხნები	693
თავი IV. ელექტროფოლადსადნობი საამქროები	699
თავი V. ზემძლავრი ღუმელების მუშაობის თანამედროვე ტექნოლოგია	707
10.5.1. დნობის ტექნოლოგია ზემძლავრ რკალურ ღუმელებში	707
თავი VI. ზემძლავრი რკალური ღუმელებიდან გამოსეულ ლითონის ღუმელსგარე დამუშავება	712
10.6.1. თხევადი ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების ძირითადი პროცესები და გამოყენების მაგალითები	713
თავი VII. ზემძლავრი რკალური ღუმელების გამოყენების პერსპექტივა	728
თავი VIII. ზემძლავრი ელექტრორკალური ღუმელების თანამედროვე ტიპები და აუცილებელი მოწყობილობა	732
10.8.1. მუდმივი დენის რკალური ფოლადსადნობი ღუმელები	734
10.8.2. ორკორპუსიანი ჭაშვური რკალური ღუმელები	741
10.8.3. ჭაშვური რკალური ღუმელები	743
10.8.4. ციციხე-ღუმელი	752
 XI ბანყოფილება. პერსპექტიული ზემძლავრი ღუმელი ფოლადის დნობის, დაყვანის, უწყვეტი ჩამოსხმისა და გლინვის ხაზით	753
 ლიტერატურა	766
I განყოფილებისათვის	766
II განყოფილებისათვის	767
III განყოფილებისათვის	769
IV განყოფილებისათვის	770
V, VI და X განყოფილებებისათვის	770
VII განყოფილებისათვის	776
VIII და IX განყოფილებებისათვის	776
XI განყოფილებისათვის	777

ფოლადის მეტალურგია

ავტორები:

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის
წევრ-კორესპონდენტი, ტექნიკის
მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი **ილია ბარათაშვილი**

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი **ანზორ გაბისიანი**

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, პროფესორი **ბურამ ლომთათიძე**

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი, დოცენტი **ბიძარ მირიანაშვილი**

საქართველოს საინჟინრო, უკრაინის
ნაციონალური პროგრესისა და
რუსეთის საბუნებისმეტყველო
მეცნიერებათა აკადემიების წევრი,
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი (მთავარი რედაქტორი) **ბურამ ქაშაკაშვილი**

ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი,
დოცენტი (რედაქტორი) **ირაკლი ქაშაკაშვილი**

რეკენზენტები:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი **სეირან მაზმიშვილი**
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი **სოზარ იაქობაშვილი**