

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ელგუჯა მინაძე

ლითონკონსტრუქციების დეროვანი ელემენტების
განგარიშება თერმომექანიკური დატვირთვისას

07.19 – სამრეწველო ინჟინერია და ტექნოლოგია

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი - 2022

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი – ომარი კიკვიძე

რეცენზენტები: გელა ყიფიანი – საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, პროფესორი.
ნოდარი ცირევიძე – აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი,
ასოცირებული პროფესორი.

დისერტაციის დაცვა შედგება 2022 წლის „—,“— 14⁰⁰ საათზე საინჟინრო-ტექნიკური
ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილ სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე.
მისამართი: 4600. ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. 59, I კორპუსი აუდ. N1114.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600. ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. 59.

ავტორეფერატი დაიგზავნა

„—,“— 2022 წ.

სადისერტაციო საბჭოს

მდივანი, ასოც. პროფესორი

ხელმოწერა

/ნ. სახამბერიძე/

თემის აქტუალობა - ღეროები, როგორც კონსტრუქციის ელემენტები ფართოდ გამოიყენება სამშენებლო კონსტრუქციებში, მანქანებში, მზომ ხელსაწყოებში, რობოტებში და მანიპულიატორებში, როგორც ძალოვანი ელემენტები, მექანიკური ენერჯის აკუმულიატორები, დრეკადი გადამცემი მექანიზმები, მოქნილი კავშირები და სხვ.

სამშენებლო კონსტრუქციების, მანქანების და ხელსაწყოების საიმედოობა დამოკიდებულია კონსტრუქციის ელემენტების საიმედოობაზე და შესაბამისად, მათი გაანგარიშებების სიზუსტეზე. ამიტომ თანამედროვე ეტაპზე მნიშვნელოვნად გაიზარდა მოთხოვნები გაანგარიშებების სიზუსტეზე მასალის რეალური თვისებების და დატვირთვის რეჟიმის გათვალისწინებით.

სამშენებლო კონსტრუქციებში, ტურბინებში, ენერგეტიკულ დანადგარებში, მანქანებში, რკინიგზის ლიანდაგებზე ღეროვანი ელემენტები განიცდიან მექანიკური და არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის ზემოქმედებას. ტემპერატურული ველის ზემოქმედება არსებით გავლენას ახდენს დეფორმირების კანონზომიერებაზე დრეკადობის ფარგლებშიც კი, იცვლება ღეროს სიმრუდე და თავისუფალი რხევის სიხშირე. მოქნილი ღეროვანი ელემენტები მნიშვნელოვნად იცვლის ფორმას, ადგილი აქვს დიდ გადაადგილებებს და ამოცანები არაწრფივია. ტემპერატურის ზრდა და არათანაბარი განაწილება იწვევს დამატებით გადაადგილებებს ლითონკონსტრუქციებში, რაც საფრთხეს უქმნის კონსტრუქციის გამართულ მუშაობას. ასეთ შემთხვევაში, განსაკუთრებით საშიშია კონსტრუქციების ექსპლუატაცია მაღალი დატვირთვების პირობებში.

პირველი ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით ანგარიშისას საჭიროა მარაგის კოეფიციენტის დაზუსტება ტემპერატურული ფაქტორის გათვალისწინებით. ამასთან ერთად გასათვალისწინებელია ტემპერატურის არათანაბარი განაწილება კვეთში, რაც დამატებით იწვევს ღეროს სიმრუდის რადიუსის ცვლილებას. იცვლება, ასევე, ძაბვების კანონზომიერება და მაქსიმალური ძაბვის სიდიდე საშიშ წერტილში. მნიშვნელოვანია, ასევე, კონსტრუქციის ელემენტების გაანგარიშება ექსტრემალურ სიტუაციებში, რომელიც გამოწვეულია ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილებით ლოკალურ მიდამოში დროის მცირე შუალედში.

სამუშაოს მიზანი კონსტრუქციის ღეროვანი ელემენტების გაანგარიშების მეთოდების დამუშავება თერმომექანიკური დატვირთვისას სტატიკური არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის მოქმედებით.

ძირითადი ამოცანები მიზნის მიღწევისათვის დისერტაციაში დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები: 1. დამუშავებულია გადატვირთვის კოეფიციენტის დაზუსტების მეთოდიკა არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის მოქმედებისას, 2. ჩაწერილია სიმტკიცის პირობა თერმომექანიკური დატვირთვისას პირველი საანგარიშო ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით, არაერთგვაროვანი სტაციონალური ტემპერატურული ველის მოქმედებით, 3. დამუშავებულია ღეროების გაანგარიშების მეთოდიკა დინამიკური დატვირთვებისას არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის მოქმედებით, 4. მიღებულია

მოდრაობის არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა თერმო-მექანიკური დატვირთვისას, 5. დამუშავებულია თავისუფალი რხევების პირველი სიხშირის გაანგარიშების რიცხვითი მეთოდი, 6. მოძრაობის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრირებისათვის სროლის მეთოდით შედგენილია გამოყენებითი პროგრამა Mathcad-ის სისტემაში, 7. დამუშავებულია ძელის თავისუფალი რხევების ექსპერიმენტალური შესწავლის მეთოდიკა ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას.

სამეცნიერო სიახლე. თბოგამტარობის განტოლების ამონახსნის გათვალისწინებით მიღებულია ფორმულა გადატვირთვის კოეფიციენტის დაზუსტებისათვის ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას ღეროს განივ კვეთში. გაანგარიშებულია გადატვირთვის კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა ტემპერატურათა სხვაობისას განივი კვეთის გვერდებზე.

მიღებულია ღეროს მოძრაობის შედარებით ზოგადი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებები თერმომექანიკური დატვირთვისას დიდი გადაადგილებების, ღეროს ღერძის დეფორმაციის და განივი კვეთის ბრუნვის ინერციის გათვალისწინებით. შემუშავებულია თავისუფალი რხევების პირველი სიხშირის გაანგარიშების მეთოდიკა არაერთგვაროვანი ტემპერატურული ველის მოქმედებით და შედგენილია გამოყენებითი პროგრამა Mathcad-ის სისტემაში. გაანგარიშებით დადგენილია საკუთარი სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

პრაქტიკული ღირებულება. სადისერტაციო ნაშრომში პრიზმული მართკუთხა ძელისათვის მიღებულია გადატვირთვის კოეფიციენტების დაზუსტებული მნიშვნელობა ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას განივ კვეთში, რაც მნიშვნელოვანია პრაქტიკოსი სპეციალისტებისათვის, რომლებიც დაკავებული არიან კონსტრუქციების პროექტირებით. დისერტაციაში დამუშავებული მეთოდიკით შესაძლებელია დაზუსტებული იქნეს გადატვირთვის კოეფიციენტი სხვა ფორმის კვეთებისათვის.

მიღებულია რხევის საკუთარი სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და შესაბამისად შესაძლებელია დავაზუსტოთ რეზონანსული ზონა, რაც მნიშვნელოვანია პრაქტიკოსი სპეციალისტებისათვის კონსტრუქციების, მანქანების პროექტირებისას. შედგენილია გამოყენებითი პროგრამა Mathcad-ის სისტემაში, რაც იძლევა საშუალებას ავტომატიზირებულ რეჟიმში ამოვხსნათ რთული საწყის სასაზღვრო ამოცანები, ამოცანები საკუთარ რიცხვებზე ღეროს ბოლოების ჩამაგრების სხვადასხვა სახისათვის.

დისერტაციაში დამუშავებული მოდელი თერმომექანიკური დატვირთვისას და მოდელის კვლევის მეთოდიკა შეიძლება გამოყენებული იქნეს ნაგებობების პროექტირებისას, რომელთა საანგარიშო სქემა შეესაბამება ერთგანზომილებიან ძელს.

დაცვაზე გამოტანილი დებულებები. გადატვირთვის კოეფიციენტის დაზუსტების მეთოდიკა სიმტკიცეზე გაანგარიშებისას პირველი საანგარიშო ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით,

ღეროს ელემენტის მოძრაობის არაწრფივი განტოლებები დიდი გადაადგილებებისას, პირველი საკუთარი სიხშირის (საკუთარი რიცხვის) გაანგარიშების მეთოდის, გაანგარიშებებით დადგენილი კანონზომიერებები, სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, ძელის დინამიკის ექსპერიმენტალური კვლევის მეთოდისა.

ნაშრომის აპრობაცია ნაშრომში დამუშავებული მეთოდები და მიღებული შედეგები მოხსენებული იქნა საერთაშორისო კონფერენციებზე „არქიტექტურის და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“ (IX კონფერენცია, 2017 წ. ბათუმი საქართველო; X კონფერენცია, 2018წ. პეკინი, ჩინეთი), II საერთაშორისო სიმპოზიუმი “სეისმომედეგობა და საინჟინრო სეისმოლოგია“ მიძღვნილი პროფესორ გ. ქარცივაძის დაბადებიდან 100 წლისთავისადმი (თბილისი, საქართველო 2019), ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის, მშენებლობის და ტრანსპორტის სპეციალურ სემინარებზე (2018, 2020,2021 წწ.).

პუბლიკაციები დისერტაციის ძირითადი შედეგები დამოქვეყნებულია 7 სამეცნიერო ნაშრომში

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, ოთხი ნაწილისაგან, ძირითადი შედეგებისა და დასკვნებისაგან, გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვისაგან, ორი დანართისაგან, გადმოცემულია 96 გვერდზე და შეიცავს: 20 ნახაზს და 2 ცხრილს. გამოყენებული ლიტერატურა შეიცავს 54 ჩამონათვალს.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია სადისერტაციო თემის აქტუალობა, ფორმულირებულია ნაშრომის მიზანი და მისი პრაქტიკული რირებულება. მოკლედ მოცემულია დისერტაციის შინაარსი.

პირველ ნაწილში მოცემულია ძაბვების და გადაადგილებების გაანგარიშება ძელში სტატიკური თერმომექანიკური დატვირთვისას. განხილულია ბ. ბოლის, ჯ. უეინერის, ი. ბირგერის ნაშრომებში წარმოდგენილი მიდგომები და მიღებული ფორმულები ძაბვებისა და გადაადგილებების განსაზღვრისათვის თერმომექანიკური დატვირთვისას. მოცემულია თერმოსიმტიკის შეფასების ზოგადი პრინციპები, მარაგის კოეფიციენტების აღწერა ძაბვის, ტემპერატურის და დროის მიხედვით. ჩაწერილია დეტალების სიმტიკის პირობა მარაგის კოეფიციენტისათვის. აღწერილია საანგარიშო ზღვრული მდგომარეობების მეთოდი, რომელიც დამუშავებული იქნა ნ. სტრელეცკის, ა.გვოზდევის და სხვ. მიერ, მეთოდის მათემატიკური ფორმულირება და მასში შემავალი გადატვირთვის კოეფიციენტები.

თერმოდრეკადობის თეორიის საფუძველზე ღეროების დინამიკის ამოცანა შესწავლილია ვ. კუპრამის, გ.ჯაიანის, ლ.ბიწამის და სხვ. ნაშრომებში. თუმცა პრაქტიკოსი სპეციალისტებისათვის უფრო მოსახერხებელია ჰიპოტეზებზე აგებული ღეროების დეფორმირების გამოყენებითი წრფივი (ს.ტიმოშენკო) და არაწრფივი (ვ.სვეტლიცკი) თეორიები. მიმოხილულია ა. ბოკაიანის, ს. არანტესის, მ.კამპას, ს.ლენცის, ხ.ლის, ა.ტანგის და სხვ. სამეცნიერო ნაშრომები, რომლებშიც შესწავლილია ღეროების დინამიკის ამოცანა თერმომექანიკური დატვირთვისას.

თანამედროვე ეტაპზე ტემპერატურის გავლენა კონსტრუქციის საიმედო ექსპლუატაციაზე მნიშვნელოვანია, თუნდაც კლიმატური პირობების ცვლილების გამო. ტემპერატურული ფაქტორი ხშირად ხდება კატასტროფების მიზეზი კონსტრუქციების დამატებითი დეფორმაციების გამო. სამეცნიერო ლიტერატურის კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე ფორმულირებულია კვლევის ამოცანები. სადისერტაციო ნაშრომში ყურადღება გამახვილებულია ტემპერატურის ფაქტორის გათვალისწინებაზე გადატვირთვის კოეფიციენტების შერჩევისას. სადისერტაციო ნაშრომში შესწავლილია ასევე ღეროს დინამიკის არაწრფივი ამოცანა. მიღებულია მოძრაობის არაწრფივი განტოლებები, დამუშავებულია მათი ამოხსნის მეთოდი, განსაზღვრულია თავისუფალი რხევის სიხშირე (ამოცანა საკუთარ რიცხვებზე). ეს რთული ამოცანები შესწავლილია რიცხობრივად Mathcad-ის სისტემაში.

მეორე ნაწილი ეთმობა ღეროს გაანგარიშებას სიმტიკივე თერმომექანიკური დატვირთვისას. აღწერილია კონსტრუქციების გაანგარიშების ზღვრული მდგომარეობების მეთოდები. დაწვრილებით განხილულია პირველი საანგარიშო ზღვრული მდგომარეობა. შემუშავებულია მეთოდოლოგია და მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები

თერმომექანიკური დატვირთვისას, ჩაწერილია სიმტკიცის პირობა და დახასიათებულია მასში შემავალი გადატვირთვის კოეფიციენტები.

განხილულია ძელის გაანგარიშების ამოცანა ღერძული დატვირთვისას და ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას კვეთში. ვთვლით, რომ დეფორმაციები მცირეა. სრული დეფორმაცია წარმოდგენილია დრეკადი და ტემპერატურული დეფორმაციების ჯამის სახით. გაანგარიშებები შესრულებულია მართკუთხა განივი კვეთის მქონე ძელისათვის. ტემპერატურის არათანაბარი განაწილების შემთხვევაში კვეთში ძაბვების განაწილების დადგენა ხორციელდება დრეკადობის თეორიის განტოლებების საფუძველზე. ტემპერატურის განაწილებისათვის კვეთში გამოიყენება სტაციონალური თბოგამტარობის ამოცანის ამონახსნი უსასრულო სიგრძის ბრტყელ კედელში. ჩაწერილია ნორმალური ძაბვის გამოსათვლელი ფორმულა და აგებულია ძაბვების ეპიურები.

$$\sigma = E \left\{ \frac{2\alpha b \int_0^{h/2} [T_2 + (T_1 - T_2) \frac{2y}{h}] dy}{bh} - \alpha [T_2 + (T_1 - T_2) \frac{2y}{h}] \right\}$$

სადაც: E - მასალის დრეკადობის მოდულია, α - ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი, T_1, T_2 - ტემპერატურებია განივი კვეთის გვერდებზე, b, h - განივი კვეთის ფუძე და სიმაღლეა შესაბამისად.

მიღებულია ცილინდრულ ღრუ ღეროში ძაბვების გაანგარიშების ფორმულა კვეთში:

$$\sigma = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2 \ln(r_2 / r_1)} \left[\frac{2}{(r_2 / r_1)^2 - 1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 - \ln \frac{r}{r_1} \right]$$

სადაც: r_1, r_2 - შიდა და გარე ზედაპირების რადიუსებია შესაბამისად, T_1, T_2 - შიდა და გარე ზედაპირების ტემპერატურებია შესაბამისად.

მიღებულია ძაბვების განაწილება კვეთში ცილინდრული ღეროსათვის სითბოს წყაროთი.

სიმტკიცის პირობა პირველი ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით ჩაწერილია შემდეგი სახით:

$$N_{con} n_1 + N_u n_2 + n_3 AE \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right) \leq AR^H \cdot k \cdot m \quad (1)$$

სადაც: N_{con}, N_u - ნორმალური ძალებია, რომლებიც შეესაბამება მუდმივ და დროებით დატვირთვებს შესაბამისად, n_1 და n_2 - გადატვირთვის კოეფიციენტებია მექანიკური დატვირთვისას, n_3 - გადატვირთვის კოეფიციენტია დაკავშირებული ტემპერატურასთან,

A -ძელის განივი კვეთის ფართობი, R^H - მასალის ნორმატიული წინააღმდეგობა, k - მასალის არაერთგვაროვნების კოეფიციენტი, m - მუშაობის პირობების კოეფიციენტი.

კოეფიციენტი n_3 დამოკიდებულია h_1/h , T_1/T_2 თანაფარდობებზე და ტემპერატურის განსხვავებაზე ნორმატიულ მნიშვნელობებიდან. აქ იგულისხმება ტემპერატურების არა მარტო რიცხობრივი მნიშვნელობების განსხვავება, არამედ, სახელდობრ, ტემპერატურის განაწილების კანონზომიერების განსხვავება საანგარიშოსაგან განივ კვეთში.

(1) თანაფარდობა წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$N_{con} \cdot n_1 + N_u \cdot n_2' \leq R^H \cdot k \cdot A \cdot m$$

სადაც შემოღებულია აღნიშვნა:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{AE \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right)}{N_u} \quad (2)$$

(2) თანაფარდობით შეიძლება განისაზღვროს დროებითი დატვირთვების გადატვირთვის კოეფიციენტი ტემპერატურული ფაქტორის გათვალისწინებით სწორი ძელების ღერძულსიმეტრიული თერმომექანიკური დატვირთვისას.

სამშენებლო ნაგებობების, საგზაო ინფრასტრუქტურის, ღია სივრცეში ლითონკონსტრუქციების პროექტირებისას ტემპერატურული ფაქტორის გათვალისწინება დროებითი დატვირთვის შესაბამის გადატვირთვის კოეფიციენტში მნიშვნელოვანია იმდენად, რამდენადაც კლიმატური პირობების ცვლილების გამო რთულია ტემპერატურების ზემოქმედების ზუსტი განსაზღვრა და მკაცრად რომ ვთქვათ, ეს ცვლილებები შემთხვევით ხასიათს ატარებს. მაგალითად, დღე-ღამის და სეზონური ტემპერატურების ცვლილება ციკლურ დატვირთვებს წარმოადგენენ სხვადასხვა სიხშირით და ამპლიტუდით და საანგარიშო მოდელში მისი ზუსტი გაათვალისწინება საკმაოდ რთულია. ჩვენი მიზანია დეტერმინირებული სახით შეფასება მივცეთ გადატვირთვის კოეფიციენტს ტემპერატურის არათანაბარი სიმეტრიული განაწილებისას განივ კვეთში.

(2) ფორმულიდან ჩანს, რომ ტემპერატურის თანაბარი განაწილებისას კვეთში და თუ ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი მუდმივია, მეორე შესაკრები მარჯვენა მხარეში ნულის ტოლია და შესაბამისად $n_2' = n_2$. წარმოვადგინოთ (2) ფორმულა შემდეგი სახით:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{1}{\varepsilon_u} \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right)$$

სადაც $\varepsilon_u = N_u / (EA)$ დროებითი ძალით გამოწვეული დეფორმაციაა.

დრეკადობის ფარგლებში ბუნებრივია ჩავთვალოთ, რომ დრეკადობის მოდული და წრფივი ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეებია. ამიტომ ბოლო ფორმულა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{\alpha}{\varepsilon_u} \left(\int \frac{\Delta T dA}{A} - \Delta T \right)$$

სითბოგამტარობის ამოცანების ამონახსნების საფუძველზე პრიზმულ ღეროში ტემპერატურის წრფივი განაწილებისას გაანალიზებულია გადატვირთვის კოეფიციენტი პირველ საანგარიშო ზღვრულ მდგომარეობაში თერმომექანიკური დატვირთვისას. გადატვირთვის კოეფიციენტისათვის მიღებულია გამოსახულება:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{2\varepsilon_u} \quad (3)$$

სადაც n_2 - გადატვირთვის კოეფიციენტი ტემპერატურული ფაქტორის გარეშე, n_3 - კოეფიციენტი დაკავშირებულია ტემპერატურის განსაზღვრის სიზუსტესთან.

(3) ფორმულიდან ჩანს, რომ გადატვირთვის კოეფიციენტი დაკავშირებული ტემპერატურულ ფაქტორთან დამოკიდებულია ტემპერატურათა სხვაობაზე. ლითონური მასალებისათვის (მცირე ნახშირბადიანი, საშუალო ნახშირბადიანი ფოლადები) დრეკადობის ფარგლებში მაქსიმალური დეფორმაცია (1-2) 10^{-3} რიგისაა. კონსტრუქციის დანიშნულებიდან გამომდინარე ეს დეფორმაცია შეიძლება უფრო მცირე იყოს. მცირენახშირბადიანი ფოლადის ხაზოვანი ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი საშუალოდ $11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ რიგისაა.

რაც შეეხება n_3 კოეფიციენტს, რომელიც დაკავშირებულია ტემპერატურის განსაზღვრის სიზუსტესთან. უნდა აღინიშნოს, რომ ზედაპირის ტემპერატურის გაზომვა ზუსტად კონტაქტური თერმომეტრით საკმაოდ რთულია. კონტაქტური თერმომეტრი, იქნება ეს წინაღობის თერმომეტრი, თერმოწყვილი ან სხვა გადამწოდი ფაქტობრივად უჩვენებს თავისი მგრძნობიარე ელემენტის ტემპერატურას. გაზომვის სიზუსტე მით უფრო მეტია, რაც უფრო მეტია მგრძნობიარე ელემენტის და გასაზომი არის თბური წონასწორობა. გადამწოდის საკმაოდ ჩანერგვისას არეში და ტემპერატურული ველის დამახინჯების არ არსებობის პირობებში ტემპერატურის გაზომვა შეიძლება იყოს მაღალი სიზუსტის. როგორც კი თერმომეტრის ჩანერგვის სიღრმე გასაზომ არეში მცირდება, სითბოს ნაკადი თერმომეტრის კორპუსიდან გარემოში იწყებს გავლენის მოხდენას ხელსაწყო ჩვენებაზე და გაზომვის ცდომილება იზრდება. კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მომენტი, რომელზეც უნდა გამახვილდეს ყურადღება სხეულის ტემპერატურის გაზომვისას - ეს არის ორი ობიექტის მახასიათებელი: თვით სხეულის, რომელზეც ვამაგრებთ გადამწოდს და გარემოს (მაგალითად ჰაერი). სითბური ნაკადი სხეულის ზედაპირიდან დამოკიდებულია ტემპერატურათა სხვაობაზე სხეულსა და გარემოს შორის, ჰაერის მოძრაობაზე ბუნებრივი

თუ იძულებითი კონვენციით. ზემოთაღნიშნულიდან გამომდინარე, სხეულის ზედაპირის ტემპერატურის გაზომვის სიზუსტე საგანგებო შესწავლას მოითხოვს და მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე უნდა მოხდეს გადატვირთვის კოეფიციენტის დადგენა.

თუ ჩავთვლით, რომ ტემპერატურები ზუსტადაა განსაზღვრული და $n_3 = 1$ კოეფიციენტი, მაშინ (3) ფორმულის თანახმად დროებითი დატვირთვის გადატვირთვის კოეფიციენტი, უნდა გაიზარდოს სიდიდით დაკავშირებული ტემპერატურის არათანაბარ განაწილებასთან განივ კვეთში. ტემპერატურათა სხვაობის ეს სიდიდეები მოცემულია ცხრილში ტემპერატურათა სხვაობის სხვა 10 °C -ით ცვლილებისას გადატვირთვის კოეფიციენტი უნდა შეიცვალოს საშუალოდ 0,04 სიდიდით.

მესამე ნაწილში განხილულია ღეროს გაანგარიშება დინამიკური თერმომექანიკური

დატვირთვებისას. მიღებულია ღეროს მოძრაობის განტოლებები სიბრტყეში დიდი გადაადგილებებისას:

$$\begin{aligned} \rho A(l) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial R}{\partial l} + q_y \\ \rho A(l) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial H}{\partial l} + q_z \\ \frac{\partial}{\partial t} (I_x \dot{\theta}) &= \frac{\partial M}{\partial l} + m + R \cos \theta - H \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial l_0} = (1 + \varepsilon_0) \sin \theta - \sin \theta_0$$

$$\frac{\partial w}{\partial l_0} = (1 + \varepsilon_0) \cos \theta - \cos \theta_0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial l_0} = \frac{1 + \varepsilon_0}{r_0} + \kappa_x$$

სადაც: ρ - მასალის სიმკვრივეა, A - განივი კვეთის ფართობი, v, w - გადაადგილებებია y, z ღერძების მიმართ შესაბამისად, I_x^0 - ღეროს ერთეული სიგრძის ელემენტის ინერციის ფიზიკური მომენტი. კვეთის მთავარი ღერძებისათვის $I_x^0 = \rho I_x$, I_x - განივი კვეთის ინერციის გეომეტრიული მომენტი, M - მღუნავი მომენტი, R, H - შიგა ძალის ვექტორის მდგენელებია, q_y, q_z - გარე განაწილებული ძალის ვექტორის მდგენელებია, m - გარე მღუნავი მომენტის მდგენელებია, ε_0 - თერმოდრეკადი ხაზის დეფორმაცია, l_0 -

არადეფორმირებული თერმოდრეკადი ხაზის რკალის სიგრძეა, κ_x - ახასიათებს სიმრუდის ცვლილებას.

ε_0 და κ_x სიდიდეები განისაზღვრებიან ფორმულებით:

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{A^*} + [\int \varepsilon^T EdA] / A^*, \quad \kappa_x = \frac{M}{I_x^*} + [\int \varepsilon^T yEdA] / I_x^*$$

სადაც: $A^* = \int EdA$ - განზოგადებული ფართობი, $I_x^* = \int y^2 EdA$ - განზოგადებული ინერციის მომენტი, $E = E(T)$ - მასალის დრეკადობის მოდულია, $T = T(y)$ - ტემპერატურაა, ε^T - ტემპერატურული დეფორმაციაა.

ნორმალური ძალა განივ კვეთში N ტოლია $N = H \cos \theta + R \sin \theta$. ჩაწერილია მე (4) განტოლებები სწორი ღეროსათვის: $r_0 \rightarrow \infty, \theta_0 = 0$.

შესწავლილია სწორი ღეროების თავისუფალი მცირე რხევები. მცირე გადაადგილებების შემთხვევაში სამართლიანია თანაფარდობები: $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1, 1/(1 + \varepsilon_0) \approx 1 - \varepsilon_0$. უგულვებელყოფილია მეორე რიგის უსასრულოდ მცირე სიდიდე $\varepsilon_0 \kappa_x$ და მიღებულია განტოლებები:

$$\begin{aligned} \rho A(z) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial R}{\partial z}, & \frac{\partial v}{\partial z} &= \theta, \\ \rho A(z) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial H}{\partial z}, & \frac{\partial w}{\partial z} &= \varepsilon_0, \\ \rho I_x(z) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} &= \frac{\partial M}{\partial z} + R, & \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \kappa_x. \end{aligned}$$

შემუშავებულია რიცხვითი გაანგარიშების მეთოდიკა საკუთარი რიცხვების (საკუთარი სიხშირის) პოვნისათვის. ძალოვანი და კინემატიკური ფაქტორები წარმოდგენილია სახით:

$$\begin{aligned} v(z, t) &= v^*(z) e^{\omega t i}, & \kappa_x(z, t) &= \kappa_x^*(z) e^{\omega t i}, \\ w(z, t) &= w^*(z) e^{\omega t i}, & R(z, t) &= R^*(z) e^{\omega t i}, \\ \theta(z, t) &= \theta^*(z) e^{\omega t i}, & H(z, t) &= H^*(z) e^{\omega t i}, \\ \varepsilon_0(z, t) &= \varepsilon_0^*(z) e^{\omega t i}, & M(z, t) &= M^*(z) e^{\omega t i} \end{aligned}$$

შესაბამისად მიღებულია ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა, რომლისთვისაც ჩაწერილია სასაზღვრო პირობები. ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა ჩაწერილია ვექტორულ-მატრიცული ფორმით. ამისათვის შემოღებულია აღნიშვნები: $x_1 = \bar{v}, x_2 = \bar{w}, x_3 = \bar{\theta}, x_4 = \bar{R}, x_5 = \bar{H}, x_6 = \bar{M}$

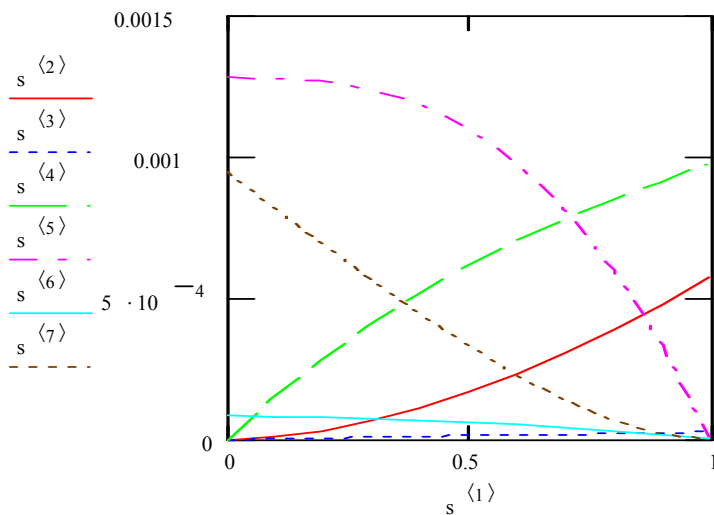
განტოლებათა სისტემა ვექტორულ-მატრიცული სახით ჩაწერილია ასე:

$$\frac{d\bar{X}}{d\bar{z}} = B\bar{X} + C \quad \text{სადაც:} \quad \bar{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{\varepsilon}_0^T \\ \bar{k}_x^T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ამოცანის რიცხვითი ამოხსნისათვის შემოღებულია უგანზომილებო სიდიდეები. მათემატიკურ რედაქტორში Mathcad საკუთარ მნიშვნელობებზე ამოცანის ამოხსნისათვის გამოიყენება ჩაშენებული ფუნქციები sbval და bvalfit. (5) განტოლებათა სისტემა ივსება დიფერენციალური განტოლებით სასაზღვრო პირობით:

$$\frac{dx_7}{d\bar{z}} = 0, \quad x_7(0) = B$$

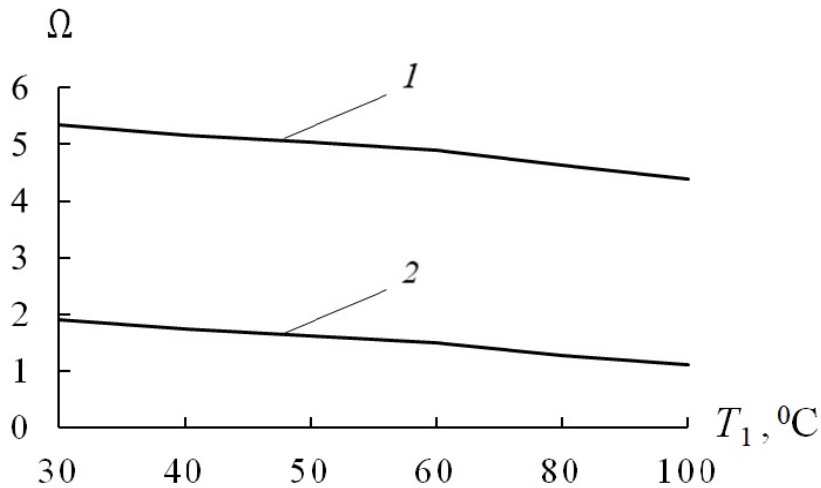
სადაც: $x_7 = \Omega^2$; B -სროლის პარამეტრია. ნახ.1-ზე მოცემულია განაგარიშების შედეგები კონსოლური ძელისათვის, როცა ტემპერატურა კვეთში იცვლება კვადრატული კანონით.



ნახ.1 გადაადგილების კომპონენტების და შიგა ძალოვანი ფაქტორების ცვლილება:

$$s^1 \equiv \bar{z}, s^2 \equiv \bar{v}, s^3 \equiv \bar{w}, s^4 \equiv \theta, s^5 \equiv \bar{R}, s^6 \equiv \bar{H}, s^7 \equiv \bar{M}$$

ნახ.2-ზე ნაჩვენებია გაანგარიშებით მიღებული საკუთარი სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე:



ნახ.2 საკუთარი სიხშირის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, 1-ტემპერატურის თანაბარი განაწილება კვეთში, 2-ტემპერატურის არათანაბარი განაწილება.

მეოთხე ნაწილში შესწავლილია კონსოლური ღეროს თავისუფალი რხევები ექსპერიმენტალურად. სპეციალური გამახურებელი მოწყობილობით ხდებოდა ღეროს გახურება. შექმნილია ექსპერიმენტალური სტენდი, შერჩეულია მზომი ხელსაწყოები. თავისუფალი რხევები ჩაიწერებოდა მგრძნობიარე ელემენტის გამოყენებით. მგრძნობიარე ელემენტად შერჩეული იქნა ვიბრაციის უნივერსალური ინდუქციური სენსორი. სენსორი შეიგრძნობს უმნიშვნელო გადაადგილებებსაც კი და წარმოქმნის მის შესაბამის ანალოგურ ელექტრულ სიგნალს. სენსორის მგრძნობელობა რეგულირდება პოტენციომეტრის საშუალებით, რომელშიც ხდება მიღებული სუსტი ანალოგური სიგნალის გაძლიერება. გაძლიერებული ანალოგური სიგნალი მიეწოდება კონექტორის ბლოკს. კონექტორიდან ციფრული სიგნალი მიეწოდება პერსონალურ კომპიუტერს USB პორტის საშუალებით. კომპიუტერში არსებული ოთხარხიანი ოსცილოგრაფი ახდენს სიგნალის ჩაწერას და იძლევა პროცესის გრაფიკულ გამოსახულებას ეკრანზე.

ძირითადი შედეგები და დასკვნები

1. მიღებულია გადატვირთვის კოეფიციენტის დაზუსტებული მნიშვნელობა პრიზმული ძელისათვის ტემპერატურული ფაქტორის გათვალისწინებით.
2. გაანგარიშებით დადგენილია, რომ ტემპერატურის არათანაბარი განაწილებისას განივ კვეთში, ტემპერატურის ყოველი 10°C -ით სხვაობისას, გადატვირთვის კოეფიციენტის ნაზრდი საშუალოდ შეადგენს 0,04;
3. მიღებულია ღეროს სიბრტყეში მოძრაობის ყველაზე უფრო ზოგადი არაწრფივი განტოლებები თერმომექანიკური დატვირთვისას კვეთის ბრუნვის ინერციის და თერმოდრეკადი ღერძული ხაზის დეფორმაციის გათვალისწინებით;
4. დამუშავებულია თავისუფალი რხევების სიხშირეების რიცხვითი გაანგარიშების მეთოდიკა;
5. შედგენილია გამოყენებითი პროგრამა და ამოხსნილია ამოცანები, რიცხვითი გაანგარიშებები შესრულებულია მათემატიკურ რედაქტორში Mathcad-ში;
6. გაანგარიშების შედეგები აჩვენებენ, რომ ღეროს თანაბარი გახურებისას ტემპერატურის გაზრდით თავისუფალი რხევების პირველი სიხშირე მცირდება. დადგენილია, რომ განივი კვეთის არათანაბარი გახურებისას, ტემპერატურის გრადიენტი არსებითად მოქმედებს რხევების სიხშირის მნიშვნელობაზე.
7. დადგენილია, რომ თავისუფალი რხევების სიხშირე განივი კვეთის არათანაბარი გახურებისას საშუალოდ სამჯერ მეტია, ვიდრე თანაბარი გახურებისას. სიხშირეებს შორის განსხვავება იზრდება ტემპერატურის გრადიენტის გაზრდით განივ კვეთში;
8. განივი კვეთის არათანაბარი გახურებისას ძელის ღერძის დეფორმაციის გათვალისწინებით, თავისუფალი რხევების პირველი სიხშირე საშუალოდ 11%-ით ნაკლებია, ვიდრე ღეროს ღერძის დეფორმაციის გათვალისწინების გარეშე;
9. დამუშავებული მეთოდიკით შეიძლება განვსაზღვროთ რეზონანსული ზონები კონსტრუქციების ღეროვანი ელემენტების თერმომექანიკური დატვირთვისას ან ნაგებობების, რომლებიც გაიანგარიშება ღეროვანი მოდელით.

გამოქვეყნებული ნაშრომები

1. O.Kikvidze, E. Minadze, G. Baisarova, R. Brzhanov Dynamics of Thermoelastic Beams/ Proceedings of the 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION, Beijing, China, 22-24, September, 2018. pp. 410-413.
2. E. Minadze, O.Kikvidze THE FIRST LIMIT STATE AT THERMOMECHANICAL LOADING/ Proceedings of the 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION, Batumi, Georgia, 13-18, September, 2017. pp. 165-166.
3. E. Minadze, O.Kikvidze ONE MODEL OF CONSTRUCTION DYNAMICS CALCULATION/ II nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SEISMIC STABILITY AND ENGINEERING SEISMOLOGY Dedicated to the 100th anniversary of professor Giorgi Kartsvadze, 16.01.2019-17.01.2019, pp. 100-104 (Tbilisi, Georgia)
4. კიკვიძე ო., მინაძე ე., სახანბერიძე ნ., სირაძე ზ. გაანგარიშების ზღვრული მდგომარეობის მეთოდი თერმოდრეკადი ღეროების ღუნვისას // ქსტუ-ს სამეცნიერო შრომები, №2 (15).-2004.-გვ.20-23
5. ე.მინაძე, ო.კიკვიძე თერმოდრეკადი ღეროების სიმტკიცე დინამიკური დატვირთვისას // აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მოამბე, №2(12).-2018. - გვ. 191-199
6. О.Г. Киквидзе, Г.Ж. Сахвадзе, Е.К. Минадзе, Р.Т. Бржанов РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕРМОУПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ// Проблемы машиностроения и автоматизации, №1 — 2021.- С.119-127 DOI 10.52261/02346206_2021_1_119
7. O. G. Kikvidze, G. Zh. Sakhvadze, E. K. Minadzea, and R. T. Brzhanov Developing a Calculation Technique for Thermoelastic Rods under Dynamic Loading// Journal of Machinery Manufacture and Reliability.- Volume 50. -№ 7.- 2021.- pp.7-15

Akaki Tsereteli State University

Copyrighted manuscript

Elguja Minadze

Design of Bar Elements of the Metal Structures
on Thermodynamical Loading

07.19 – Industrial Engineering and Technology

The Author's Abstract

**of the Doctoral Thesis Nominated for Academic Degree
of the Doctor of Engineering**

Kutaisi - 2022

Akaki Tsereteli State University

Scientific Advisor: Professor Omar Kikvidze

Reviewers: Gela Kipiani – Georgian Technical University, Professor;
Nodar Tsirekidze - Akaki Tsereteli State University, Associate Professor

Defense of a thesis will be held on 26 April of 14⁰⁰ H. at the session of the Dissertation Commission created by Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering. Address: Auditorium N1114, Building I, 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi.

Dissertation is available in the library of the Akaki Tsereteli State University at the address: 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi.

The Author's Abstract had been sent out "-----"

Dissertation Council

Secretary, Associate Professor _____ /N. Sakhamberidze/

Relevance of the topic. Bars as structural elements are widely used in building structures, machines, measuring instruments, robots and manipulators as load-bearing elements, mechanical energy accumulators, flexible transmissions, flexible connections, and so on.

The reliability of building structures, machines and tools depends on the reliability of structural elements and, consequently, on the accuracy of their design. Therefore, at the current stage, requirements for the design accuracy have increased significantly taking into account the real properties of the material and the load regime.

In building structures, turbines, power plants and machines, the bar elements on the train tracks are exposed to mechanical impacts and the influence of a non-uniform temperature field. The impact of the temperature field substantially affects the regularity of deformation even within limits of elasticity, by changing the curvature of the bar and the frequency of natural oscillation. Flexible bar elements change shape significantly, large displacements occur and problems are nonlinear. The temperature rise and uneven distribution cause additional displacements in the metal structures, which endangers smooth operation of the structure. In such a case, it is especially dangerous to operate the structures under high load conditions.

When calculating the ultimate limit state, it is necessary to specify the safety factor taking into account the temperature factor. In addition, uneven temperature distribution in the section should be taken into account, which additionally causes a change in the radius of the curvature of bar. The regularity of the stresses and the magnitude of the maximum stress at the dangerous point also change. It is also important to calculate the design elements in extreme situations caused by a sharp change in temperature in a local area over a short period of time.

The goal of the work is to develop methods for design of bar elements of a structure under the action of a static nonhomogeneous temperature field on thermomechanical loading.

The main objectives that have been set and solved in the dissertation for achieving the goal are as follows: 1. The methodology for specifying the overload factor under the action of a nonhomogeneous temperature field was developed; 2. The strength condition on thermomechanical loading in accordance with the calculating ultimate limit state was recorded under the action of a nonhomogeneous temperature field; 3. The methodology for design of bars on dynamic loadings under the action of a nonhomogeneous temperature field was developed; 4.

The system of non-linear differential of motion was obtained; 5. Numerical method for calculating the first frequency of natural oscillations was developed. 6. The applied program was created in a Mathcad system for integration of non-linear differential equations of motion by shooting method; 7. The methodology for a pilot study of natural oscillations during uneven distribution of temperature.

Novelty of research. Taking into account the solution to the thermal-conductivity equation, formula was obtained for specifying the overload factor during uneven distribution of temperature in the cross-section of bar. The numerical value of the overload factor at the temperature difference on the cross-section sides was calculated.

The relatively general nonlinear differential equations of bar motion were obtained by considering large displacements, deformation of the bar axis, and inertia of the cross-section rotation on thermomechanical loading. The methodology for calculating the first frequency of natural oscillations under the action of a nonhomogeneous temperature field was developed and the applied program was created in a Mathcad system. The calculation resulted in establishing the relationship between the natural frequency and temperature.

Practical bearing. In the dissertation, the specified values of the overload factors for the prismatic rectangular bar were obtained during uneven distribution of temperature in the cross-section, which is important for practitioners who are engaged in the design of structures. By using the methodology developed in the dissertation, it is possible to specify the overload factor for the sections of different forms.

The relationship between the natural frequency of oscillation and the temperature was obtained, allowing us to specify the resonance zone, which is important for practitioners when designing the structures and machines. The applied program was composed in a Mathcad system, allowing us to solve the complex initial boundary problems automatically, and the eigenvalue problems for different types of the bar end attachment.

The model on thermomechanical loading developed in the dissertation and the model research methodology can be used in the design of structures whose calculation scheme conforms to a one-dimensional bar.

The provisions brought to defense. The methodology for specifying the overload factor when calculating the stiffness according to the ultimate limit state, the nonlinear equations of motion of bar element at large displacements, the methodology for calculating the natural frequency (eigenvalue), the regularities determined by the calculations, the temperature dependence of the frequency and the methodology for a pilot study of the dynamics of bar.

Approbation of work. The methods and results obtained in the dissertation paper were presented at the international conferences "Modern Problems of Architecture and Construction" (IX Conference, 2017 Batumi Georgia; X Conference, 2018 Beijing, China), II International Symposium "Earthquake Resistance and Engineering Seismology" devoted to the 100th anniversary of the birth of Professor G. Kartsivadze (Tbilisi, Georgia 2019), the main results of the paper were presented at the special special-purpose seminars of Akaki Tsereteli State University's Department of Civil Engineering and Transport (2018, 2020, 2021).

Publications. The main results of the dissertation paper have been published in 7 scientific papers.

Volume and Structure of Dissertation. Dissertation includes Introduction, four chapters, major results and conclusions, list of references and two annexes. It comprises comprises 96 printing pages and contains 20 drawings and 2 tables. References include 54 literature titles.

Content of work

The introduction justifies the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose of the paper and its practical value. The content of the dissertation is briefly given.

The first chapter presents the calculation of stresses and displacements on static thermomechanical loading in the bar. It also reviews the approaches presented in papers of B. Ball, J. Weiner, and I. Birger and the formulas obtained for the determination of stresses and displacements on thermomechanical loading. It also provides the general principles of thermal stability evaluation, describing the safety factor according to stress, temperature and time. There is recorded the strength condition of parts for the safety factor. It also describes the method of calculating the limit state, which was developed by N. Streletsky, A. Gvozdev and others, as well as the mathematical formulation of the method and its overload factors.

Based on the theory of thermoelasticity, the problem of bar dynamics is studied in works of V. Kupradze, G. Jaiani, L. Bitsadze and others. However, the applied linear (S. Tymoshenko) and nonlinear (V. Svetlitsky) theories of deformation of bars built on the hypotheses are more convenient for practitioners. It also reviews research papers of A. Bokayan, S. Arantes, M. Kampa, S. Lenz, H. Lee, A. Tang and others. Scientific papers in which the problem of bar dynamics on thermomechanical loading is studied.

At the modern stage, the influence of temperature on reliable operation of the structure is of high importance, if only because of changing climatic conditions. The temperature factor often becomes the cause of disasters due to additional deformations of the structures. Research objectives have been formulated on the basis of critical analysis of the scientific literature. The dissertation focuses on the temperature factor when selecting the overload factors. The dissertation also examines the nonlinear problem of bar dynamics. Nonlinear equations of motion was obtained, the method of their solution was elaborated, and the frequency of natural oscillation was determined (eigenvalue problem). These complex problems were studied numerically in a Mathcad system.

The second chapter dwells on the calculation of strength of the bar on thermomechanical loading. It also describes methods of the limit states for structural analysis. The calculating ultimate limit state is discussed in detail. A methodology has been developed and the basic ratios

of thermomechanical loads have been obtained, the strength conditions have been recorded and the overload factors included therein have been described.

The problem of design of bar on axial loading and during uneven temperature distribution in the section is discussed. We believe that the deformations are small. Complete deformation is represented as the sum of the elastic and temperature deformations. The calculations are performed for a bar with a rectangular cross-section. In the case of uneven temperature distribution, the determination of the stress distribution in the section is based on the equations of the elasticity theory. To distribute the temperature in the section, the solution of the stationary heat conduction problem is used in a flat wall with an infinite length. The normal stress calculation formula is written and the stress diagrams are constructed.

$$\sigma = E \left\{ \frac{2\alpha b \int_0^{h/2} [T_2 + (T_1 - T_2) \frac{2y}{h}] dy}{bh} - \alpha [T_2 + (T_1 - T_2) \frac{2y}{h}] \right\},$$

where E - material modulus of elasticity, α - coefficient of thermal expansion, T_1, T_2 - temperatures on the cross-section sides b, h - the base and the height of the cross-section, respectively.

The formula for calculating the stress in a cylindrical hollow bar in the section has been obtained:

$$\sigma = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)}{2 \ln(r_2 / r_1)} \left[\frac{2}{(r_2 / r_1)^2 - 1} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 - \ln \frac{r}{r_1} \right],$$

where r_1, r_2 - radii of the internal and external surfaces, respectively; T_1, T_2 - temperatures of the internal and external surfaces, respectively.

Stress distribution in the section for a cylindrical bar with a heat source has been obtained.

The strength condition according to the ultimate limit state is recorded as follows:

$$N_{con} \cdot n_1 + N_u n_2 + n_3 AE \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right) \leq AR^H \cdot k \cdot m, \quad (1)$$

where N_{con}, N_u - normal forces that correspond to constant and temporary loads respectively; n_1 and n_2 - the overload factors on mechanical loading; n_3 - the overload factor associated with a temperature; A - the area of the bar cross-section; R^H - characteristic strength of the material; k coefficient of non-homogeneity of the material; m - service factor.

The factor n_3 depends on a ratio of h_1/h , T_1/T_2 and deviation of the temperature from standard values. This implies not only the difference in the numerical values of the temperatures, but also, namely, the difference in the regularity of the temperature distribution from the calculating value in the cross section.

The ratio (1) is presented as follows:

$$N_{con} \cdot n_1 + N_u \cdot n_2' \leq R^H \cdot k \cdot A \cdot m,$$

where the following expression is introduced:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{AE \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right)}{N_u} \quad (2)$$

By means of the ratio (2), it is possible to determine the overload factor of temporary loads taking into account the temperature factor on thermomechanical loading of the straight bars.

When designing buildings, road infrastructure, and metal structures in an open space, the temperature factor must be taken into account in the appropriate overload factor of temporary loads, as it is difficult to accurately determine the impacts of temperatures due to climate change, and strictly speaking, these changes appear to be random. For example, the changes in day and seasonal temperatures are the cyclic loads with different frequencies and amplitudes, and its exact calculation in the calculation model is quite difficult. Our aim is to give a deterministic estimate of the overload factor with uneven symmetric temperature distribution in the cross-section.

From the formula (2), it can be seen that when the temperature is evenly distributed in the section, and if the coefficient of thermal expansion is constant, the second sum on the right-hand side is equal to zero and consequently $n_2' = n_2$. Represent formula (2) as follows:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{1}{\varepsilon_u} \left(\int_A E \alpha \Delta T dA / \int_A E dA - \alpha \Delta T \right),$$

where $\varepsilon_u = N_u / (EA)$ - deformation caused by a temporary force.

Within elasticity limits, it is natural to assume that the modulus of elasticity and the coefficient of linear temperature expansion are constant values. Therefore, the latter formula can be presented as follows:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{\alpha}{\varepsilon_u} \left(\int_A \Delta T dA / A - \Delta T \right)$$

The overload factor is analyzed during the linear temperature distribution in the prismatic bar based on the solutions to heat conduction problems, on thermodynamical loading in the ultimate limit state. The following expression has been obtained for the overload factor:

$$n_2' = n_2 + n_3 \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{2\varepsilon_u}, \quad (3)$$

where n_2 - the overload factor without the temperature factor; n_3 - the factor associated with the accuracy of temperature determination.

From formula (3), it can be seen that the overload factor related to the temperature factor depends on the temperature difference. For metallic materials (low carbon, medium carbon steels), the maximum deformation within elasticity limits is of (1-2) 10^{-3} order. Depending on the purpose of the construction, this deformation may be even smaller. The coefficient of linear temperature expansion of low carbon steel is on average of $11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ$ order.

As for the coefficient n_3 associated with the accuracy of temperature determination. It should be noted that measuring accurate the surface temperature with a contact thermometer is quite difficult. The contact thermometer, be it a resistance thermometer, thermocouple or other

transmitter actually shows the temperature of its sensitive element. The greater the accuracy of the measurement, the greater the sensitivity of the element and the thermal equilibrium is what to be measured. The temperature measurement can be of high accuracy when the transmitter is quite embedded in the head and in the absence of a temperature field distortion. As soon as the insertion depth of the thermometer decreases in the measuring area, the heat flow from the thermometer housing to the environment begins to affect the readout of the device and the measurement error increases. Another important point to be considered when measuring the body temperature is the characteristics of two objects: the body itself to which we attach the transmitter and the environment (e.g. air). Heat flow from the surface of the body depends on the temperature difference between the body and the environment, the movement of air by natural or forced convection. Due to the above, the accuracy of the body surface temperature measurement requires extraordinary study and based on the analysis of the obtained results, the overload factor must be determined.

If we assume that the temperatures are precisely determined and the coefficient $n_3 = 1$, then according to formula (3), the overload factor of temporary load must be increased by the magnitude associated with uneven temperature distribution in the cross-section. These values of the temperature difference are given in Table. When the temperature difference changes by 10 °C, the overload factor should change by an average of 0.04.

The third chapter discusses design of the bar on dynamic thermomechanical loads. The equations of motion of the bar at large displacements in the plane have been obtained:

$$\begin{aligned}
 \rho A(l) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial R}{\partial l} + q_y \\
 \rho A(l) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial H}{\partial l} + q_z \\
 \frac{\partial}{\partial t} (I_x \dot{\theta}) &= \frac{\partial M}{\partial l} + m + R \cos \theta - H \sin \theta
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial l_0} &= (1 + \varepsilon_0) \sin \theta - \sin \theta_0 \\ \frac{\partial w}{\partial l_0} &= (1 + \varepsilon_0) \cos \theta - \cos \theta_0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial l_0} &= \frac{1 + \varepsilon_0}{r_0} + \kappa_x\end{aligned}$$

where ρ - material density, A - the area of the cross-section, v, w - displacements towards y, z axes, respectively; I_x^0 - physical moment of inertia of the length unit of bar element. For the basic axes of the section $I_x^0 = \rho I_x$; I_x - geometrical moment of inertia of the cross-section; M - bending moment, R, H - components of the internal force vector; q_y, q_z - components of the distributed external force vector; m - components of the external bending moment; ε_0 - deformation of thermo-elastic line; l_0 - the length of the arc of thermo-elastic line; κ_x - characterizes change in the curvature.

ε_0 and κ_x values are determined according to formulas as follows;

$$\varepsilon_0 = \frac{N}{A^*} + \left[\int \varepsilon^T E dA \right] / A^*, \quad \kappa_x = \frac{M}{I_x^*} + \left[\int \varepsilon^T y E dA \right] / I_x^*,$$

where $A^* = \int E dA$ - generalized area, $I_x^* = \int y^2 E dA$ - generalized moment of inertia, $E = E(T)$ - material modulus of elasticity; $T = T(y)$ - temperature; ε^T - temperature deformation.

The normal force in the cross-section N equals $N = H \cos \theta + R \sin \theta$. The (4) equations for the straight bar: are written $r_0 \rightarrow \infty, \theta_0 = 0$.

Small natural oscillations of straight bars were studied. In case of small displacements the following ratios are valid: $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, $1/(1 + \varepsilon_0) \approx 1 - \varepsilon_0$

The infinitely small value of the second order is neglected and the following equations were obtained::

$$\begin{aligned}\rho A(z) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial R}{\partial z}, & \frac{\partial v}{\partial z} &= \theta, \\ \rho A(z) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial H}{\partial z}, & \frac{\partial w}{\partial z} &= \varepsilon_0, \\ \rho I_x(z) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} &= \frac{\partial M}{\partial z} + R, & \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \kappa_x.\end{aligned}$$

Numerical calculation method was developed to find free oscillations (natural frequency). The power and kinematic factors are represented in the form as follows:

$$\begin{aligned}v(z, t) &= v^*(z)e^{oiti}, & \kappa_x(z, t) &= \kappa_x^*(z)e^{oiti}, \\ w(z, t) &= w^*(z)e^{oiti}, & R(z, t) &= R^*(z)e^{oiti}, \\ \theta(z, t) &= \theta^*(z)e^{oiti}, & H(z, t) &= H^*(z)e^{oiti}, \\ \varepsilon_0(z, t) &= \varepsilon_0^*(z)e^{oiti}, & M(z, t) &= M^*(z)e^{oiti}\end{aligned}$$

Accordingly, the ordinary system of differential equations was obtained, for which boundary conditions were written. System of equations in the vector-matrix form is as follows:

$$\frac{d\bar{X}}{d\bar{z}} = B\bar{X} + C \quad \text{where} \quad \bar{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{\varepsilon}_0^T \\ \bar{\kappa}_x^T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

For numerical solution of the problem, dimensionless values were introduced. is used The built-in functions *sbval* and *bvalfit* were used in the Mathcad math editor to solve the eigenvalue problem. The equation system (5) is filled with a differential equation with boundary condition::

$$\frac{dx_7}{d\bar{z}} = 0, \quad x_7(0) = B$$

where $x_7 = \Omega^2$; B - shooting parameter. Figure 1 illustrates the calculation results for a cantilever bar, when the temperature in the section changes in accordance with a quadratic law.

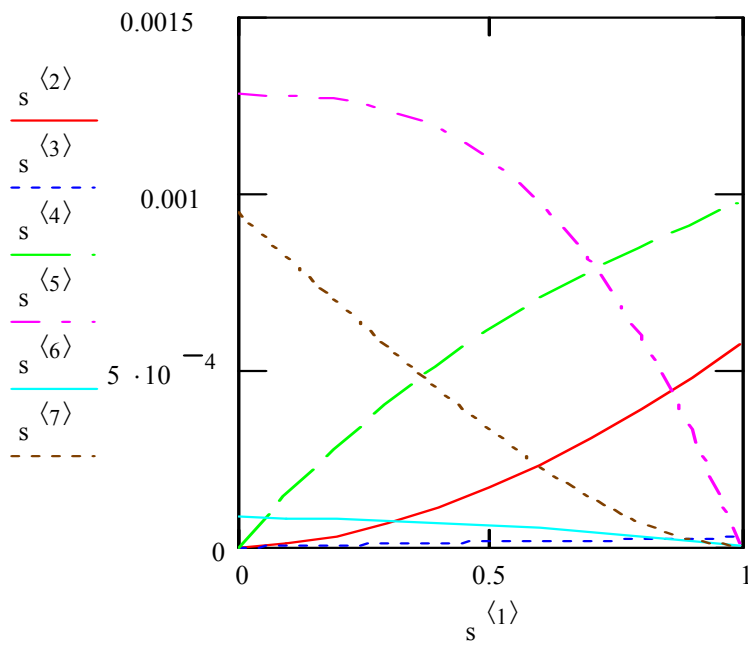


Figure 2 illustrates the relationship between the natural frequency and temperature obtained through the calculation:

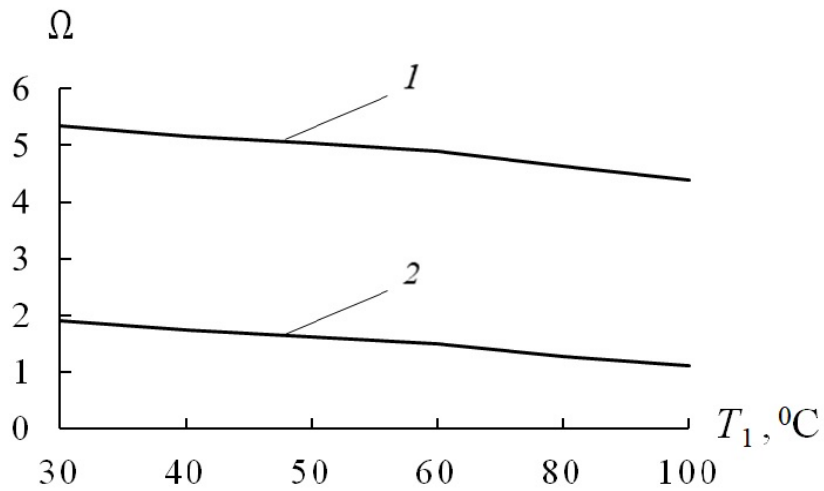


Fig. 2. The relationship between the natural frequency and temperature, 1- even temperature distribution in the section; 2- uneven temperature distribution.

The fourth chapter dwells on a pilot study of natural oscillations of a cantilever bar. The bar was heated with a special heating device. Experimental test-bench was created and the measuring tools were selected. Natural oscillations would be recorded using a sensitive element. A universal induction vibration sensor was selected as the sensitive element. The sensor detects even slight movements and generates its corresponding analog electrical signal. The sensitivity of the sensor is regulated by a potentiometer, which amplifies the received weak analog signal. The amplified analog signal is supplied to the connector block. The digital signal from the connector is delivered to the personal computer through the USB port. The four-channel oscilloscope in the computer records the signal and displays the graphical representation of the process on the screen.

Basic results and recommendations

1. The adjusted value of the overload factor was obtained for the prismatic bar taking into account the temperature factor.
2. It was calculated that in the case of uneven temperature distribution in the cross section, for every 10°C temperature difference, the increase in the overload factor averages 0.04;
3. The most general nonlinear equations of motion in the plane of the bar were obtained, taking into account the rotatory inertia of the section and the deformation of the thermo-elastic axial line on thermomechanical loading;
4. The method of numerical calculation of the frequencies of natural oscillations was developed;
5. The applied program was developed and problems were solved, numerical calculations were performed in Mathcad's Math Editor;
6. The results of the calculation show that the first frequency of natural oscillations decreases with increasing temperature of the bar with even heating. It has been established that in the case of uneven heating of the cross-section, the temperature gradient substantially affects the value of the oscillation frequency.
7. It has been established that the frequency of natural oscillations is three times higher on average in the case of uneven heating of the cross section than in the case of even heating. The difference between the frequencies increases with increasing temperature gradient in the cross-section;
8. Taking into account deformation of the bar axis during uneven heating of the cross-section, the first frequency of natural oscillations is on average 11% lower than when neglecting this deformation;
9. The developed methodology can be used to determine the resonance zones on thermomechanical loading of bar elements of the structures or buildings that are calculated using the bar model.

Publications

8. O.Kikvidze, E. Minadze, G. Baisarova, R. Brzhanov Dynamics of Thermoelastic Beams/ Proceedings of the 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION, Beijing, China, 22-24, September, 2018. pp. 410-413.
9. E. Minadze, O.Kikvidze THE FIRST LIMIT STATE AT THERMOMECHANICAL LOADING/ Proceedings of the 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTEMPORARY PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION, Batumi, Georgia, 13-18, September, 2017. pp. 165-166.
10. E. Minadze, O.Kikvidze ONE MODEL OF CONSTRUCTION DYNAMICS CALCULATION/ II nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SEISMIC STABILITY AND ENGINEERING SEISMOLOGY devoted to the 100th anniversary of professor Giorgi Kartsivadze, 16.01.2019-17.01.2019, pp. 100-104 (Tbilisi, Georgia)
11. O.Kikvidze, E. Minadze, N. Sakhanberidze, Z. Siradze, Numerical method for calculating the limit state under bending of thermo-elastic bars //KSTU scientific works, No. 2 (15).-2004.- pp. 20-23
12. E. Minadze, O.Kikvidze. The strength of thermo-elastic bars // Bulletin of Akaki Tsereteli State University, No. 2 (12).-2018. - pp. 191-199
13. О.Г. Киквидзе, Г.Ж. Сахвадзе, Е.К. Минадзе, Р.Т. Бржанов РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕРМОУПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ// Проблемы машиностроения и автоматизации, №1 — 2021.- С.119-127 DOI 10.52261/02346206_2021_1_119
14. O. G. Kikvidze, G. Zh. Sakhvadze, E. K. Minadzea, and R. T. Brzhanov Developing a Calculation Technique for Thermoelastic Rods under Dynamic Loading// Journal of Machinery Manufacture and Reliability.- Volume 50. -№ 7.- 2021.- pp.7-15