

Министерство науки и образования Грузии
Государственный университет Акакия Церетели

На правах рукописи

Какауридзе Акакий

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
КРИСТАЛЛИЗАТОРА С НЕПЛАВЯЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ
ПЕЧИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА С ЦЕЛЬЮ
ПОЛУЧЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

0408 - Механика инженерии и технология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание академической степени
доктора инженерии

Кутаиси 2017

Государственный университет Акакия Церетели

Научные руководители:

- доктор технических наук, эмеритус М.Ш.Шаламберидзе;
- академический доктор, профессор П.Н.Кипиани.

Официальные рецензенты:

- академический доктор, профессор О.Г.Зивзивадзе;
- академический доктор, ассоциированный профессор С.О.Миндадзе.

Защита состоится **26 декабря 2017 года в 14 часов**, на заседании диссертационной комиссии, созданной диссертационным советом инженерно-технического факультета. Адрес: г. Кутаиси, ул. Тамар мепе, № 59, I корпус, аудитория № 1114.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного университета Акакия Церетели по адресу: г. Кутаиси, ул. Тамар мепе, № 59.

Автореферат разослан «24» __11__2017 г.

Секретарь
диссертационного совета,
ассоциированный профессор

/Н. П. Саханберидзе/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Во множестве стран мира: США, Японии, Китае, Англии, Украине и других, широко распространена такая отрасль электрометаллургии, как электрошлаковый переплав (ЭШП) металлов. Он предназначен для повторной переработки сталей, полученных методами обычной металлургии, с целью улучшения их структуры, механических и физических свойств. Из-за необходимости потребления большого количества электроэнергии стоимость полученной электрошлаковым переплавом стали высока (в два раза больше, чем сталей, полученных металлургическими методами). Уменьшение тепловых потерь при электрошлаковом переплаве металлов возможно с использованием предложенного кристаллизатора с неплавящимися электродами и новой схемы процесса, что значительно уменьшит себестоимость стали электрошлакового переплава. Разработка и исследование конструкции предложенного кристаллизатора является темой представленной диссертационной работы, поэтому она актуальна.

Цель исследования. Разработать кристаллизатор новой конструкции и новую схему электрошлакового переплава металлов; уменьшить шунтирование тока в процессе переплава; увеличить коэффициент формы шлаковой ванны с целью уменьшения тепловых потерь.

Предмет исследования. Новая конструкция кристаллизатора, технология и новая схема ЭШП металлов.

Задачи исследования:

1. Анализ схем ЭШП металлов и конструкций кристаллизатора.
2. Создание модели для исследования кристаллизатора с неплавящимися электродами.
3. Исследование факторов, влияющих на величину проходящего в стенках кристаллизатора тока при ЭШП металлов.
4. Исследование электрического поля в шлаковой ванне кристаллизатора с неплавящимися электродами.
5. Исследование металла, полученного ЭШП с целью его использования в качестве электродного материала для дуговой сварки.

Научная новизна:

1. Разработана новая конструкция кристаллизатора с неплавящимися электродами и предложена новая схема ЭШП металлов.

2. Создана физическая модель кристаллизатора с неплавящимися электродами и с ее помощью исследовано электрическое поле в шлаковой ванне.

Установлено, что концентрация потенциала электрического поля в шлаковой ванне вблизи стенок кристаллизатора с неплавящимися электродами высокая, а в пространстве вдоль оси кристаллизатора концентрация потенциала электрического поля низкая.

3. Установлено, что во внутреннем пространстве шлаковой ванны кристаллизатора с неплавящимися электродами выравнивание электрического поля возможно в случае новой схемы ЭШП, когда в процессе плавления на верхний неплавящийся и плавящийся электроды от источника питания одновременно подается один и тот же потенциал.

4. Установлено, что при новой конструкции кристаллизатора и новой схеме ЭШП металлов коэффициент формы шлаковой ванны приближен к единице, что вызывает увеличение производительности процесса и уменьшение тепловых потерь.

5. Разработана математическая модель ЭШП, в соответствии с которой, при использовании метода конечных разностей показано, что картина изменения электрического поля идентична результатам исследований, полученным по физической модели. Это позволяет в дальнейшем производить исследование электрического поля (температурного поля) при ЭШП металлов кристаллизатором с неплавящимися электродами по математической модели.

6. Исследования показали, что в случае использования металла, полученного с помощью ЭШП в качестве электродного материала для сварки нефтегазопроводных труб, вероятность образования трещин практически равна нулю.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовался комплексный метод исследований, включающий:

- экспериментальное использование новой конструкции кристаллизатора и схемы ЭШП материалов;
- применение метода конечных разностей с использованием математического и физического моделирования;
- современные средства для измерения тока и температуры.

Практическое значение работы.

- при разработке технологии ЭШП металлов в кристаллизаторе увеличенного диаметра с неплавящимися электродами, полученной по результатам исследования электрического поля с помощью физической модели, с целью выравнивания электрического поля в шлаковой ванне можно будет определять

величину напряжения, получаемого от источника питания;

- новая конструкция кристаллизатора и новая схема процесса может быть использована для ЭШП как металлических порошковых (стружкообразных), так и неметаллических материалов;
- для практического использования и дальнейшего усовершенствования новой конструкции кристаллизатора для ЭШП, необходимо исследование электрических и температурных полей, что может быть выполнено методом конечных разностей и с использованием математической модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая конструкция кристаллизатора установки ЭШП металлов.
2. Новая схема ЭШП металлов.
3. Физическая модель кристаллизатора с неплавящимися электродами и результаты, полученные при ее исследовании.
4. Стальной электродный материал, полученный ЭШП металлов, для электродуговой сварки нефтегазопроводных труб.

Внедрение результатов работы.

1. Разработанная новая конструкция кристаллизатора и новая схема ЭШП металлов будет использована: для изготовления деталей ответственных изделий и выплавки качественной стали.
2. Для ремонтных работ в машиностроении и для производства легированных сталей.
3. Использование высокотемпературных печей для переработки твердых отходов с целью защиты окружающей среды.
4. Выплавленный качественный металл будет использован в качестве электродного материала для сварки ответственных изделий.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований были представлены в научных докладах и выступлениях: на ежегодных научно-технических семинарах инженерно-технического факультета Государственного университета Акакия Церетели (г.Кутаиси); на II, III и IV международных научных конференциях: «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития» (Кутаиси, 2010г., 2013г., 2015г., 2016г.); на международной научно-практической интернет-конференции «Инновационные проблемы и технологии» (Кутаиси, 2011г.); на международной научно-практической конференции «Современные инженерные технологии и защита окружающей среды» (Кутаиси, 2016г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работы, в том числе три публикации в рецензируемых изданиях, которые входят в список, утвержденный Диссертационным советом.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы из 78 наименований. Напечатана и сверстана на компьютере, содержит 114 страниц, включая 44 рисунков, 12 таблиц.

Содержание диссертационной работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены и проанализированы схемы ЭШП металлов и конструкции кристаллизаторов. Подробно изложены особенности охлаждения кристаллизатора и существующие проблемы. Рассматриваются также вопросы моделирования процесса ЭШП металлов. В частности, рассмотрена математическая модель температурного поля шлаковой ванны в плавящемся кристаллизаторе, так как процессы, протекающие в шлаковой ванне кристаллизатора такой конструкции, должны быть сравнительно близки к процессам, происходящим в шлаковой ванне предложенного нами кристаллизатора с неплавящимися электродами. В указанной математической модели температурное поле имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C\rho T + \mu\rho h(T, T_s, T_\zeta)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right), \quad (1)$$

где $0 < r < R_z$, при $0 < Z < S(t)$; $R_1 < r < R_2$, при $S(t) < Z < H_2$;

$T(r, Z, T_\zeta)$ – температура, $^{\circ}\text{C}$;

λ, C, ρ - коэффициенты температуропроводности, теплопроводности и плотности отливки;

R_1 и R_2 - внутренний и внешний радиусы стенки плавящегося кристаллизатора;

$S(t)$ - уровень жидкого металла в кристаллизаторе;

H - высота отливки в кристаллизаторе.

$$\eta(T, T_3, T_\zeta) = \begin{cases} 1, & T > T_\zeta \\ e(T), & T_3 \leq T \leq T_\zeta; e(T) = \frac{T - T_s}{T_\zeta - T_s} \end{cases} \quad (2)$$

При решении математического выражения, соответствующего математической

модели, граничные условия отражают особенности теплообмена на соответствующем участке и имеют следующий вид:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (3)$$

граничное условие симметричности по отношению к оси температурного поля отливки:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_{\perp} (T - T_{cp}) + \varepsilon \sigma T^4 (R_r, Zt); \quad (4)$$

условие теплообмена стенок отливки со средой:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1 (Z, t), \quad S(t) < Z < h(t), \quad (5)$$

где α_1 - коэффициент теплопередачи;

T - температура поверхности отливки, $^{\circ}\text{K}$;

T_{cp} - температура среды вокруг отливки, $^{\circ}\text{K}$;

$h(t)$ - уровень шлака в кристаллизаторе.

Граничное условие, определяющее поток теплоты, который направлен от шлака к стенке кристаллизатора:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \psi \varepsilon \sigma [T^4 (R, Z t) - T_4], \quad h(t) < Z < H. \quad (6)$$

Условие нагрева внутренней стенки кристаллизатора путем излучения из кристаллизатора:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = a_n (T - T_B). \quad (7)$$

Несмотря на множество действующих в шлаковой ванне факторов, ее сопротивление с большим приближением можно считать активным сопротивлением (это подтверждается совпадением фаз тока и напряжения). С учетом этого условия, в третьем разделе решена математическая модель с целью исследования электрического поля шлаковой ванны.

На основании рассмотренных в первом разделе вопросов, установлено:

- если ЭШП будет производиться на превышенных больших или меньших мощностях, чем нужно для данной производительности, тогда будет получена отливка с поверхностными или структурными дефектами;

- в процессе ЭШП металлов должно соблюдаться необходимое соотношение между выделенным в шлак теплом и теплом, отводимым от кристаллизатора, в результате правильного конструирования и эксплуатации кристаллизатора;

- если кристаллизатор имел бы независимые секции неплавящегося верхнего и нижнего электродов, каждая из них имела бы независимую систему охлаждения, тогда была бы упрощена установка нужного соотношения между выделенным и отведенным теплом.

Во второй главе проанализирован процесс переноса расплавленного металла в шлаковой ванне при ЭШП металлов. От него в значительной степени зависят процессы десульфурации и дегазации.

Выявлены факторы, влияющие при переплаве металлов на еще большее улучшение физико-механических свойств, на размеры капли, на увеличение коэффициента формы шлаковой ванны. В этом же разделе показано, что при ЭШП металлов, уменьшение тепловых потерь возможно при увеличении коэффициента формы шлаковой ванны.

В третьей главе приведены и проанализированы результаты исследования электрического поля в шлаковой ванне при ЭШП металлов.

Подробно рассматриваются модели, используемые при исследовании процессов ЭШП металлов. В том числе, для исследования электрического поля в шлаковой ванне разработана так называемая двумерная физическая модель (рис.1). Она представляет собой лист толщиной 1 мм из нержавеющей стали X18H9T, соразмерный с ванной, на котором выделены токоподводы неплавящегося и плавящегося электродов. Токоподводы предварительно соединены с источником тока. С помощью щупа и милливольтметра замеряется потенциал электрического поля отдельных точек модели.

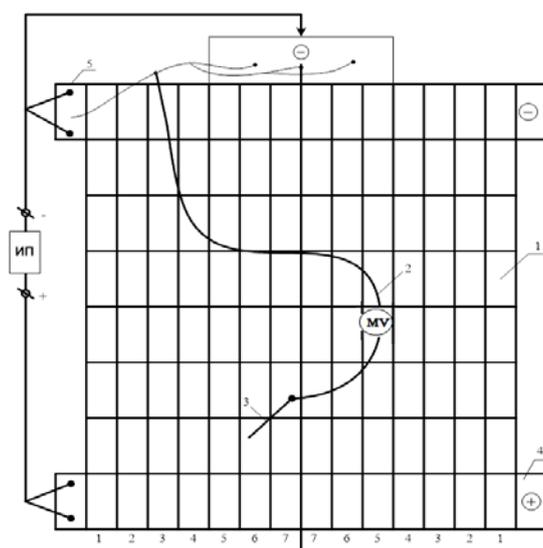


Рис.1 Двумерная физическая модель шлаковой ванны:

1-источник питания; 2-проводники; 3-щуп; 4-элементарная ячейка (H=5мм, B=25 мм) масштаб М 1:2; mv – милливольтметр

По модели было выявлено, что электрическое поле в шлаковой ванне неравномерное. В частности, величина потенциала от стенки неплавящегося электрода к центру кристаллизатора уменьшается. Была выявлена зона, в которой потенциал равен нулю. Расположение нулевого потенциала зависит от величины напряжения, приложенного от источника питания (рис.2).

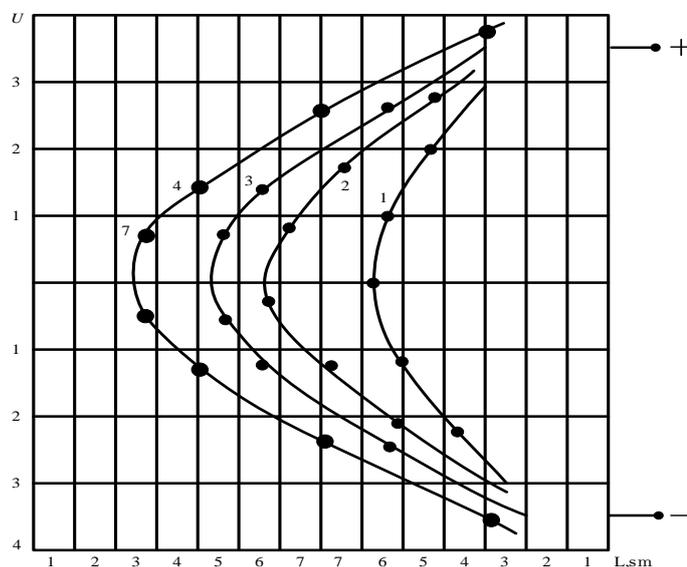


Рис.2 Экспериментальные кривые, на которых потенциал равен нулю:
 1- $U=4$ в; 2- $U=3$ в; 3- $U=2$ в; 4- $U=1$ в

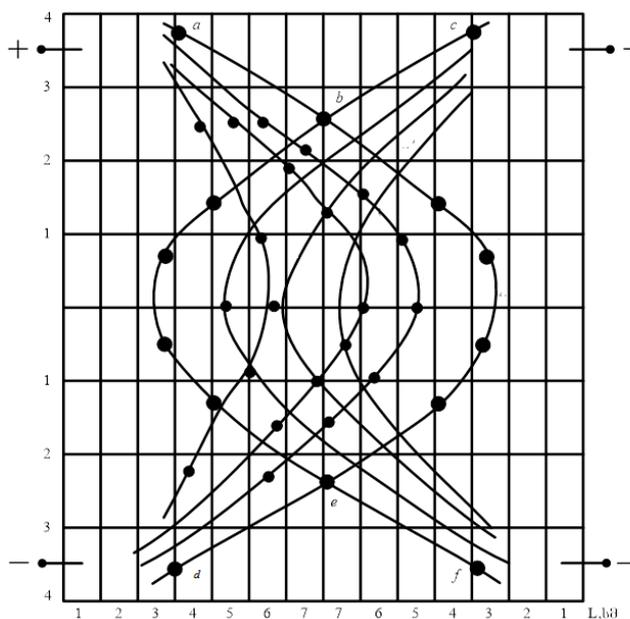


Рис.3 Кривые экспериментальных зависимостей, на которых потенциал равен нулю, когда источник питания подсоединен к модели со всеми зажимами неплавящегося электрода

Как видно из рис.3, когда напряжение на источнике питания $U=1$ в, тогда в центральной части кристаллизатора, которая ограничена фигурой b4e7b, ток не будет проходить, т.е. в этой части шлаковой ванны тепло не будет выделяться, здесь температура определяется теплопроводностью шлака.

При ЭШП металлов в кристаллизаторе с неплавящимися электродами, когда источник питания подсоединен только к плавящемуся электроду и к днищу кристаллизатора, как показывают исследования двумерной физической модели (рис.4), потенциал в шлаке распределен равномерно.

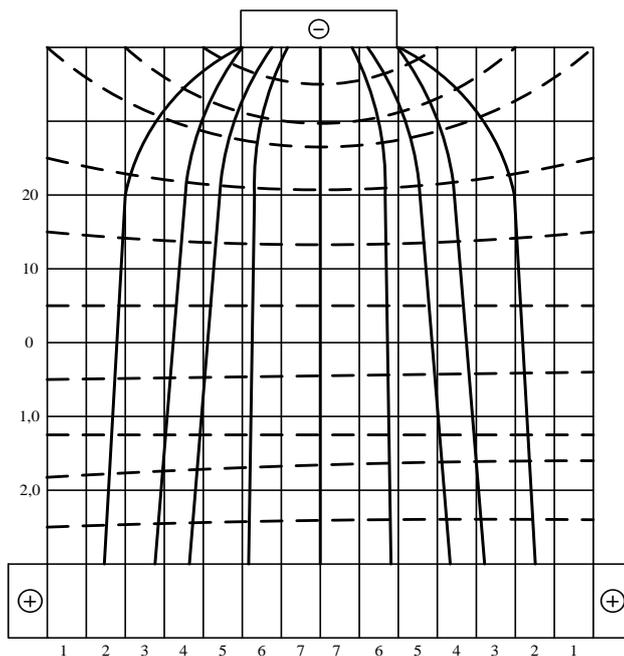


Рис.4 Распределение потенциала в шлаке при ЭШП, когда источник питания подсоединен к плавящемуся электроду и к днищу кристаллизатора (пунктирная линия – эквипотенциальная линия, сплошная линия – линия тока)

Исследования, результаты которых представлены на рис.2, рис.3, рис.4, позволили предположить, что процесс ЭШП будет протекать тогда, когда ток проходит одновременно между неплавящимся электродом и плавящимся электродом и дном кристаллизатора. С учетом указанного, исследование электрического поля в шлаковой ванне показало (рис.4), что электрическое поле в центре кристаллизатора и вблизи стенки кристаллизатора распределено сравнительно равномерно.

На основании исследования электрического поля в шлаковой ванне, предложена новая схема ЭШП металлов: одновременно токопроводящими должны быть неплавящиеся электроды, а также пространство между плавящимся электродом и дном кристаллизатора, при этом, к верхнему неплавящемуся электроду и к плавящемуся электроду должен быть приложен потенциал от одних и тех же зажимов (рис.5).

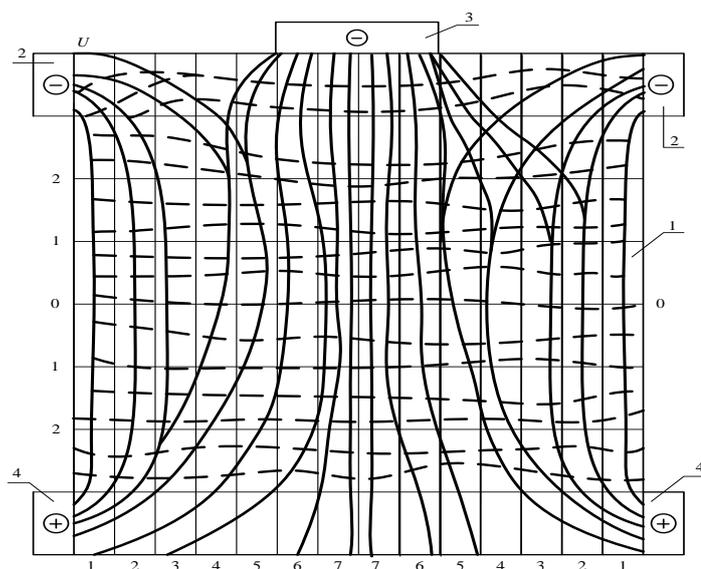


Рис.5 Картина исследования электрического поля, когда процесс переплава протекает с участием неплавящегося и плавящегося электродов одновременно

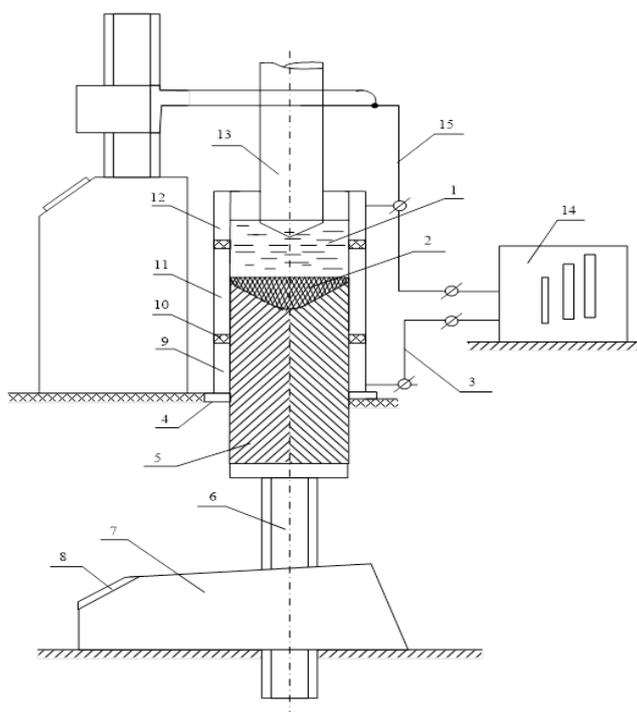


Рис.6 Новая схема ЭШП металлов:

1 – шлаковая ванна; 2 – ванна металла; 3 – токоподвод к нижнему неплавящемуся электроду кристаллизатора источника питания; 4 – дно кристаллизатора; 5 - отливка; 6 – винт вытяжки; 7 - механизм вытяжки; 8 – пульт управления; 9 – нижний неплавящийся электрод; 10 – изоляционный слой; 11 – средняя секция; 12 – верхний неплавящийся электрод; 13 – плавящийся электрод; 14 - источник питания; 15 – токоподвод; 16 – механизм подачи

ЭШП металлов по такой схеме (рис.6) позволяет: в процессе переплавки избежать короткого замыкания между плавящимся и неплавящимся электродами; из-за уменьшения тепловых потерь повысить к.п.д. процесса.

В этом же разделе исследовано электрическое поле в шлаковой ванне с использованием математической модели. Исследованная математическая модель имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0. \quad (8)$$

Математическая модель решена с учетом условия $\rho = const$:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (9)$$

Уравнение (9) в виде конечных разностей:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{h^2}, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2h}. \quad (11)$$

В выражении (8) дифференциальное уравнение в частных производных принимает вид:

$$4\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j+1} + \left(1 + \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i+1,j} + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j-1}, \quad (12)$$

в развернутом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\varphi_{1,1} = \varphi_{1,2} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,1} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,1} + \varphi_{1,0} \\ 4\varphi_{1,2} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,2} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,2} + \varphi_{1,1} \\ 4\varphi_{1,3} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,3} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,3} + \varphi_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ 4\varphi_{m,n} = \varphi_{m,n+1} + \left(1 + \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m+1,n} + \left(1 - \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m-1,n} + \varphi_{m,n-1} \end{array} \right. \quad (13)$$

С учетом граничных условий, $i=0 \dots 6$, $\varphi_{i,0} = 4$ в, $j = 0 \dots 6$, $\varphi_{4,j} = 2$ в. В остальной части границы имеем: $i = 7 \dots 10$ $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$, $j = 7 \dots 10$, $\varphi_{4,j} = \varphi'_{4,j}$.

Из-за симметрии относительно оси z, имеем: $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$, $\varphi_{i,10} = \varphi''_{i,10}$, $i = 1 \dots 4$.

Таблица 1. Результаты расчета по модели

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi =$	4	4	4	4	4	4	3.457	3.191	3.061	3.007
1	3.469	3.503	3.48	3.455	3.428	3.371	3.192	3.062	2.989	2.956
2	3.108	3.01	2.965	2.938	2.918	2.905	2.893	2.884	2.878	2.875
3	2.512	2.484	2.463	2.451	2.452	2.483	2.619	2.719	2.775	2.8
4	2	2	2	2	2	2	2.406	2.611	2.713	2.755

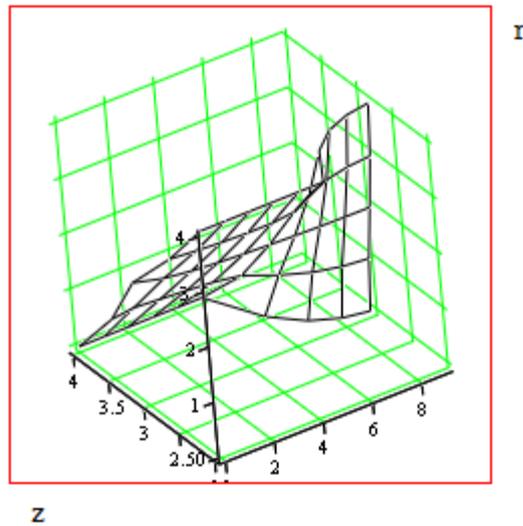


Рис.7 График распределения потенциала (поверхность)

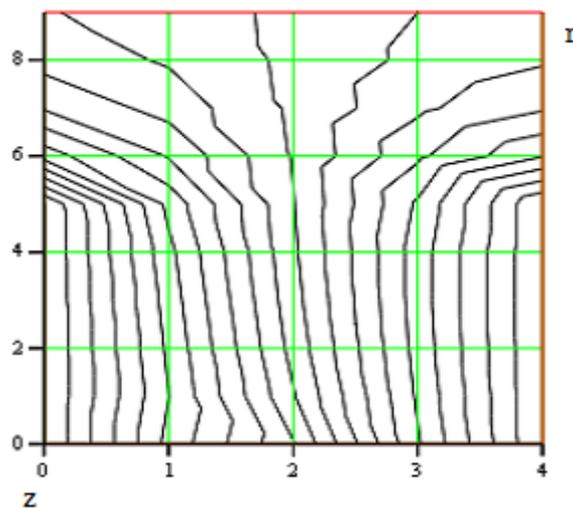


Рис.8 Контурный график потенциала

Результаты расчета по математической модели показаны в таблице 1, на рис.7 и рис.8. Они показывают, что картины электрического поля, полученные по физической и математической моделям, аналогичны, что позволяет сделать вывод: при ЭШП в последующих исследованиях электрического поля жидкого шлака, можно пользоваться представленной математической моделью.

В четвертой главе исследовано, что полученная с помощью ЭШП сталь с улучшенными свойствами может быть использована в качестве электродного материала для различных ответственных конструкций, в том числе и при электродуговой сварке нефтегазопроводов. С этой целью разработана методика для исследования образования горячих трещин в конструкциях, сваренных полученным ЭШП электродным материалом. Приведены материалы металлографических и экспериментальных исследований:

1. имеет значение влияние чистоты сварочных материалов на качество сварного соединения;
2. существенно влияние содержания серы и фосфора на процесс образования кристаллизационных трещин в сварном соединении, особенно при сварке высокоуглеродистых сталей;
3. при уменьшении количества серы и фосфора в сварочной проволоке, возрастает сопротивляемость свариваемых материалов образованию кристаллизационных трещин как при однопроходной, так и при многопроходной сварке;
4. уменьшение количества серы и фосфора в сварочной проволоке на 0,01% обеспечивает получение бездефектного (без кристаллизационных трещин) сварного соединения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих схем ЭШП металлов показывает, что во всех случаях проходящие в кристаллизаторе процессы определяют нужную структуру, состав и качество отливки, полученной переплавом. При ЭШП металлов обеспечение требуемого состава, структуры, производительности вместе с качеством, низкой себестоимости отливки возможно, если в процессе переплава будет соблюдено нужное соотношение между выделившимся в шлак количеством тепла и количеством тепла, отводимого в процессе переплава.
2. При ЭШП металлов регулирование соотношения между теплом, выделившимся в

шлаковой ванне и теплом, отводимым в процессе переплава, возможно с помощью кристаллизатора с неплавящимися электродами. Соединение неплавящихся электродов с источником питания дает возможность того, что наличие расплавленного шлака не будет зависеть от плавящегося электрода. При замене плавящегося электрода это позволяет сохранить шлак в жидком состоянии. С помощью указанного кристаллизатора возможен переплав неметаллических и порошковых материалов.

Одновременное присоединение к одному и тому же зажиму (потенциалу) источника питания плавящегося электрода и нижнего неплавящегося электрода позволяет максимально приблизить коэффициент формы к единице, чем можно оказать значительное влияние на тепловое состояние шлаковой ванны.

3. Улучшение условий управления тепловым процессом в кристаллизаторе новой конструкции будет способствовать существованию жидкого шлака между шлаковой коркой и кристаллизатором. Этим будет улучшено качество металлической отливки.
4. В разработанном кристаллизаторе новой конструкции имеется повышенная возможность управления тепловым процессом и из-за этого управления процессом расплавления плавящегося электрода с еще большим улучшением физико-механических свойств, по сравнению со свойствами отливки, полученной с помощью существующих кристаллизаторов.
5. При ЭШП металлов по новой схеме, из-за увеличения коэффициента формы, тепловые потери в кристаллизаторе уменьшаются и возрастает к.п.д. процесса ЭШП металлов.
6. Протекание процесса ЭШП определяется электрическим полем жидкого шлака, исследование которого для кристаллизатора новой конструкции с неплавящимися электродами возможно по физической модели.
7. Двумерная физическая модель для исследования кристаллизатора с неплавящимися электродами, представляет собой тонкий лист (толщиной до 1 мм), изготовленный из нержавеющей стали X18H9T, который имеет токоподводы к неплавящемуся и плавящемуся электродам. Размеры стальных листов равны размерам сечения вдоль оси внутреннего пространства кристаллизатора с неплавящимися электродами. В нем проходит ток, соразмерный с током, необходимым для переплава. Потенциал в отдельных его точках определяется с помощью щупа и милливольтметра.

8. Исследование электрического поля кристаллизатора с помощью физической модели показало, что в пространстве вблизи оси кристаллизатора потенциал низкий. Здесь температура обусловлена теплопроводностью шлака. Объем этого пространства зависит от напряжения, приложенного к неплавящимся электродам.
9. Исследование электрического поля по физической модели показало, также что при ЭШП по новой схеме, когда один и тот же зажим источника питания присоединен одновременно к верхнему неплавящемуся и плавящемуся электродам, распределение электрического поля в шлаке у стенки и в центре кристаллизатора практически одинаковое.
10. Сравнение результатов математического моделирования процесса ЭШП с результатами исследования электрического поля по физической модели показывает, что математическая модель с успехом может быть использована для исследования электрического поля электрошлакового процесса.
11. В случае использования полученной с помощью ЭШП стали в качестве электродного материала при сварке нефтегазопроводных труб, в зоне сварного шва значительно уменьшается вероятность образования трещин.

Список основных трудов, в которых опубликованы результаты диссертации

1. Пхакадзе Ф., Какауридзе А., Шаламберидзе М. Компьютерная система контроля качества электроконтактной сварки габаритных металлоконструкций. /Международная научная конференция «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2010, с.212-215.
2. Какауридзе А., Пхакадзе Ф., Шаламберидзе М., Хвадагиани А. Вопросы электрошлаковой переплавки металлов. /Международная научно-практическая интернет-конференция «Инновационные проблемы и технологии». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2011. с.44-46.
3. Шаламберидзе М., Какауридзе А., Пхакадзе Ф., Суламанидзе А. Электрическое поле при ЭШП. /II Международная научная конференция «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2013, с.188-193.
4. Какауридзе А., Зивзивадзе Л., Цципуришвили Т., Шаламберидзе М. Определение токов, проходящих в кристаллизаторе при ЭШП металлов, и исследование

- факторов, влияющих на их величины. /«Моамбе», №3. Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2014, с.82-86.
5. Какауридзе А., Цкипуришвили Т., Шаламберидзе М. Исследование электрического поля при ЭШП металлов. /III Международная научная конференция «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2015, с.273-277.
 6. Шаламберидзе М., Какауридзе А., Цкипуришвили Т., Пхакадзе Ф., Гегучадзе А. Печь ЭШП для сжигания и переплавки технологических и бытовых отходов. /Международная научно-практическая конференция «Современные инженерные технологии и защита окружающей среды». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2016, с.59-61.
 7. Кипиани П., Герадзе П., Какауридзе А. Влияние электродного металла, полученного при ЭШП, на процесс образования кристаллизационных трещин. /«Моамбе», № 9. Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2017, с.243-254.
 8. Какауридзе А., Мардалеишвили Н., Зивзивадзе Л., Шаламберидзе М. Исследование электрического поля по математической модели. /Georgian Engineering News, №2 (vol.82), 2017. с.25-29
 9. Какауридзе А., Зивзивадзе Л., Цкипуришвили Т., Шаламберидзе М. Условия формирования отливки при ЭШП. /IV Международная научная конференция «Энергетика: региональные проблемы и перспективы развития». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2016, с.270-273.
 10. Какауридзе А., Зивзивадзе Л., Силагадзе С., Шаламберидзе М. Перспектива использования высокотемпературной печи для переработки твердых бытовых отходов. /Международная научная конференция «Сельскохозяйственные и транспортные машины: перспективы развития с учетом современных требований стандартизации и управления качеством». Гос университет Акакия Церетели. Кутаиси, 2017, с.128-131.