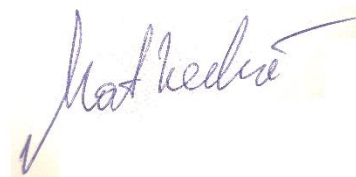


На правах рукописи



Матвеева Мария Андреевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВАННЫ ЖИДКОГО
МЕТАЛЛА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПРОТЯЖЁННОСТИ ПЕРЕХОДНОЙ
ЗОНЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СЛИТКОВ
СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА**

2.6.2 – Metallurgy of black, colored and rare metals

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре техники и технологии производства материалов филиала в г. Златоусте.

**Научный
руководитель:**

Чуманов Илья Валерьевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техники и технологии производства материалов филиала ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте.

**Официальные
оппоненты:**

Левков Леонид Яковлевич,

доктор технических наук, заведующий лабораторией специальной электрометаллургии АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва;

Аникеев Владимир Викторович,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

**Ведущая
организация:**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Защита состоится 30 апреля 2025 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 на базе ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д.76, ауд. 1001 главного учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/matveeva-mariya-andreevna>

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ (НИУ), учёный совет. Тел. (351) 267-91-13, e-mail: matveevama@susu.ru.

Автореферат разослан

«_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н, доцент



Шабурова Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Увеличение срока службы машин и агрегатов, повышение их надёжности в условиях критических нагрузок – одно из важнейших звеньев проблемы повышения качества изделий. Решение этой задачи невозможно без разработки и внедрения новых, более совершенных материалов и эффективных технологических процессов, по возможности не требующих больших материальных затрат, что так же отвечает Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. (Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. 4260-р) в области импортозамещения, развития высоких переделов и разработки новых материалов.

Причиной выхода из строя деталей различных машин в большинстве случаев является развитие усталостных эффектов и коррозионно-эрозионное повреждение в результате циклических термомеханических нагрузок. Решение существующих проблем лежит в плоскости создания металлических материалов нового композиционного состава и упрочнения уже существующих композиций (сталей и сплавов) путём введения мелкодисперсных частиц и нанесением специальных покрытий. Возможным способом развития может стать создание многослойных материалов, в которых подбираются слои, обладающие определёнными свойствами, и их последовательность при формировании заготовки, что обеспечит заданные параметры получаемой металлопродукции. На современном этапе развития производства актуальность таких материалов возросла в связи с возросшими потребностями военно-промышленного комплекса, а также принятия программы развития судостроения.

Как показала практика, для получения высококачественных многослойных заготовок наиболее целесообразно применять электрошлаковые технологии, поскольку они обеспечивают максимально надёжное – жидкофазное – соединение слоёв. На сегодняшний день предлагается большое количество разработок по получению биметаллических и многослойных слитков с использованием электрошлаковой технологии, но широкого применения они не получили по причине ряда трудностей, которыми являются: обеспечение необходимого состава ванны жидкого металла формируемого многослойного слитка, а также большая протяжённость переходной зоны. Актуальной задачей остаётся принципиальное воздействие на переходную зону с целью снижения её протяжённости.

Анализ технологических решений, направленных на изменение фронта кристаллизации жидкой металлической ванны, показал, что наиболее перспективной является технология ЭШП с реализацией вращения расходуемого электрода. Она позволяет изменять место доставки капель электродного металла в жидкую металлическую ванну, что приводит к перераспределению тепловых потоков и способствует формированию горизонтального фронта кристаллизации при минимальной глубине металлической ванны. Однако необходимо оценить

влияние технологии переплава с вращением расходуемого электрода на структуру и свойства формируемого слитка для подтверждения обеспечения удовлетворительных характеристик процесса.

Совмещение технологии вращения расходуемого электрода с введением специальных частиц, корректирующих химический состав металлической ванны, позволяет сформировать многослойный слиток с минимальной переходной зоной между слоями различного химического состава. Появляется возможность введения в металлическую ванну частиц с удельным весом, сравнимым с удельным весом флюсов ЭШП, а также частиц, вступающих в физико-химическое взаимодействие с флюсом.

Актуальность работы подтверждается её поддержкой в следующих грантах: конкурс УМНИК – 2015 договор № 9117ГУ/2015 от 24.12.2015 «Разработка технологии изготовления клинков холодного оружия из композиционного материала, полученного по технологии электрошлакового переплава», РФФИ 12-08-31129 «Разработка и конструирование материала с задаваемым комплексом механических и физических свойств методом электрошлакового переплава» 2012 г., Поддержка молодой науки – 2021 «Исследование поведения теплового центра в зависимости от внешних воздействий при электрошлаковом переплаве с целью разработки передовой технологии получения полых заготовок методом электрошлакового переплава, обладающего максимальной энергоэффективностью».

Степень разработанности темы исследования

Формирование ванны жидкого металла при электрошлаковом переплаве (ЭШП) определяет протяжённость переходной зоны при производстве многослойных слитков. Для получения минимальной переходной зоны необходимым условием является формирование горизонтального фронта кристаллизации и минимальной глубины металлической ванны при формировании слитка ЭШП. Воздействовать на форму металлической ванны изменением технологических параметров (скорость подачи электрода, подводимая мощность, глубина шлаковой ванны) без потери качественных показателей переплава невозможно. Это послужило толчком для развития технологий ЭШП с применением внешних воздействий: электромагнитных сил, механической и ультразвуковой вибрации электрода, продувки газами и газопорошковыми смесями, применение токопроводящего кристаллизатора и др.

Различные виды внешних воздействий оказывают влияние на процессы рафинирования, формирования кристаллической структуры, тепловую эффективность процесса, гидродинамику шлаковой и металлической ванны, каплеобразование на торце расходуемого электрода и формирование фронта кристаллизации в жидкой металлической ванне. Основные исследователи по этому направлению – Б.И. Медовар, Б.Е. Патон, Ю.В. Латаш, А.Г. Глебов, Г.А. Хасин, Ю.М. Миронов, С.А. Истомин, В.И. Чуманов, Л.Я. Левков и др.

Наиболее перспективными по воздействию на фронт кристаллизации являются работы, предметом исследований которых является влияние вращения расходуемого электрода при осуществлении классического одноэлектродного процесса. Данные исследования показали, что за счёт смещения теплового центра наблюдается уменьшение глубины жидкой металлической ванны и образование плоского фронта кристаллизации. В ряде работ указывается, что за счёт изменения условий каплеобразования происходит повышение рафинирующей способности процесса.

Целью работы является теоретическое обоснование и разработка технического решения получения многослойного слитка с минимальной протяжённостью переходной зоны между слоями методом электрошлакового переплава и расширение возможности доставки корректирующих материалов в жидкую металлическую ванну, минимизируя контакт с рабочим флюсом и обеспечивая максимальное их усвоение.

Для достижения цели диссертационной работы поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие способы получения многослойных заготовок методом ЭШП, влияние внешних воздействий на каплеобразование, распределение тепла в шлаковой и металлической ваннах, структуру формируемой заготовки.

2. Оценить влияние электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода на структуру и свойства формируемого слитка.

3. Определить условия получения минимальной глубины металлической ванны в зависимости от скорости вращения расходуемого электрода как фактора, позволяющего формировать многослойный слиток с наименьшей протяжённостью переходной зоны.

4. Разработать технологические схемы получения многослойных слитков методом ЭШП по одноэлектродной схеме и провести опытные плавки по предлагаемым технологиям. Выполнить исследования структуры, прочностных механических характеристик и провести усталостные испытания экспериментального многослойного материала.

5. Провести серию опытных переплавов по разработанной технологии для получения многослойных слитков с введением в металлическую ванну добавок (WC, TiC, B₄C) и исследовать металл на предмет их усвоения.

Научная новизна работы

1. Математически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость между положением фронта кристаллизации формируемого слитка и местом доставки капель электродного металла в металлическую ванну. Установлено, что минимальная глубина металлической ванны формируется в случае доставки капель электродного металла на $2/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора.

2. Установлено влияние изменения места доставки капель электродного металла на свойства формируемого слитка. Показано, что в случае переплава с

вращением расходуемого электрода наблюдается рост показателей: плотности на 2 %, микротвёрдости на 6 %, механических характеристик ($\sigma_B + 6$ %, $\sigma_T + 7$ %, КСЧ +38 %) в сравнении с заготовкой, полученной переплавом без вращения расходуемого электрода. Уменьшается размер дендритной ячейки на 26 %. Возрастает однородность перечисленных характеристик в поперечном направлении слитка.

3. Показана возможность введения добавок WC, TiC, B₄C в металлическую ванну формируемого слитка через каплю электродного металла в процессе электрошлакового переплава. Установлено, что процент усвоения карбида вольфрама составляет 85 %, карбида титана – 55 %, карбида бора – 24 %.

Практическая значимость работы

1. Создана компьютерная программа для ЭВМ «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки ЭШП с вращающимся электродом» (А.с. № 20161215 от 12.02.2021), позволяющая определять положение фронта кристаллизации слитка ЭШП в зависимости от технологических параметров переплава.

2. Предложен способ получения многослойных заготовок методом электрошлакового переплава, позволяющий уменьшить протяжённость переходной зоны между слоями.

3. Определено влияние расположения слоёв на усталостные характеристики, основные механические свойства нового многослойного материала. Установлено, что долговечность зависит от расположения слоёв в сечении испытуемых образцов. Значения механических характеристик многослойного материала после термической обработки по режиму – отжиг 1030 °С (охлаждение с печью) + закалка 1050 °С (охлаждение в масле) + отпуск при 400 °С – составляют: $\sigma_B = 1286$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1259$ МПа, $\delta = 12$ %, 64 HRC.

4. Разработан новый способ введения добавок для изменения химического состава металлической ванны в каплю электродного металла при электрошлаковом переплаве (Патент РФ № 2701698 от 30.09.2019).

5. Результаты, представленные в диссертационной работе, внедрены и используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлениям 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» в филиале ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте.

Методология и методы исследования

Для математического моделирования изменения гидродинамики в шлаковой ванне и тепловой картины использованы программные среды MathCAD и Mat Lab.

Для проведения опытных переплавов использована модернизированная полупромышленная установка электрошлакового переплава А-550, оснащенная механизмом вращения расходуемого электрода, термические печи для проковки флюса и термической обработки ПКЛ-1.2 – 12.

Для анализа структуры экспериментальных слитков использованы: комплекс подготовки макро- и микрошлифов Buehler, металлографический микроскоп C. Zeiss Observer D1.m, оснащённый программным комплексом Thixomet PRO, микротвердомер МПК-1. Определение плотности проводилось методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139-69 при температуре 20 °С на весах ВЛР-200.

Механические свойства определялись на разрывной машине УТС 110М, маятниковом копре ИО 5003-0,3, твердомерах ТР-5014 и ИТР-МЖ.

Химический состав экспериментальных слитков определялся на эмиссионном спектрометре МСА II и сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 700IF.

Усталостные испытания многослойного материала проведены на вибростенде Bruel and Kjaer VC-LAN 7542 Центра испытаний и мониторинга состояния конструкций ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты математического моделирования о положении фронта кристаллизации жидкой металлической ванны при формировании слитка ЭШП в зависимости от места доставки капель электродного металла.

2. Способы и технологические режимы получения многослойных слитков методом электрошлакового переплава с минимальной переходной зоной между слоями.

3. Результаты исследования механических и усталостные характеристики нового многослойного материала.

4. Практические рекомендации по введению корректирующих добавок через каплю электродного металла при электрошоковом переплаве.

Достоверность полученных результатов обеспечивается надёжностью исходных данных, применением современных методов математического моделирования, исследованием процессов в соответствии с полученными результатами, известными теоретическими закономерностями и данными других исследователей по изучаемой тематике.

Личный вклад автора

Проведение анализа литературных и патентных источников. Научно-теоретическое обоснование, формирование цели и направления исследований, постановка задач. Все эксперименты, расчеты и исследования в диссертации выполнены при участии автора, в том числе получение многослойных слитков с корректирующими добавками и их исследование. Анализ и обработка результатов, выявление закономерностей, апробация результатов исследований, написание научных публикаций, инициирование выступлений с докладами на конференциях.

Апробация работы

Результаты исследования доложены лично автором на международных конференциях: VI Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации», г. Екатеринбург, 2–3 мая 2019 г.; XVI Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла (ISCON-2021), г. Екатеринбург, 25–27 мая 2021 г.; XVII Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла (ISCON-2023), г. Магнитогорск, 16–20 апреля 2023 г.; XIX Международная научная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали», г. Аша, 10–12 сентября 2024 г.

Публикации

По результатам диссертационных исследований опубликовано 17 печатных работ, включая 11 работ в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и индексируемых в базе данных Scopus, 2 патента на изобретения и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников. Работа изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 34 таблицы, список использованных источников из 139 наименований и 6 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении указана степень проработки и обозначена актуальность тематики исследования, сформулирована цель работы и задачи диссертационного исследования, приведена научная новизна работы и практическая значимость исследований. Обозначена основная терминология, касающаяся темы получения многослойных металлических заготовок жидкофазными способами, в частности с применением технологии ЭШП, позволяющей совместить в одной операции надёжное соединение слоёв различного химического состава и повышение качественных характеристик за счёт рафинирования и направленной кристаллизации.

В первой главе проведён анализ влияния технологических факторов (скорости подачи электрода, подводимой мощности, глубины шлаковой ванны) влияющих на геометрию металлической ванны при электрошлаковом переплаве, как лимитирующей стадии при формировании многослойных слитков, полученных с помощью электрошлакового переплава. Из проведённого обзора следует, что, изменяя технологические параметры процесса, сформировать горизонтальный фронт кристаллизации при минимальной глубине металлической ванны невозможно без потери качества переплава. Решение вопроса заключается в воздействии на переплавной процесс внешних сил, в частности наложения центробежных сил в шлаковой ванне за счёт реализации вращения расходуемого электрода вокруг собственной оси.

Во второй главе представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния реализации вращения расходуемого электрода на комплекс

свойств формируемого слитка. Сравнивались загрязнённость неметаллическими включениями, микротвёрдость, плотность, размер дендритной ячейки, комплекс механических свойств (σ_B , σ_T , KCU) слитков из стали марки 30X13, полученных по классической одноэлектродной схеме и при переплаве с вращением расходуемого электрода. Относительно исходного количества включений в материале расходуемого электрода в случае его вращения количество включений снижается на 58 %, в случае переплава без вращения – на 33 %.

Данные значений микротвёрдости по сечению слитка от центра к краю, с экспоненциальной линией тренда, представлены на рис. 1. Измерения показали, что микротвёрдость образца, полученного по классической технологии без вращения, ниже, чем с использованием механизма вращения электрода – в среднем 486,5 HV и 519,6 HV соответственно. Отклонение значений микротвёрдости от среднего значения в случае классического переплава составляет 9,85 %, а при технологии с вращением электрода – 6,73 %. Значения плотностей, размера дендритной ячейки, предела прочности, текучести и ударной вязкости отражены в табл. 1.

Из полученных данных следует, что реализация технологии вращения приводит к снижению концентрации неметаллических включений, выравниванию микротвёрдости и размера дендритной ячейки по сечению, увеличению плотности и росту механических характеристик.

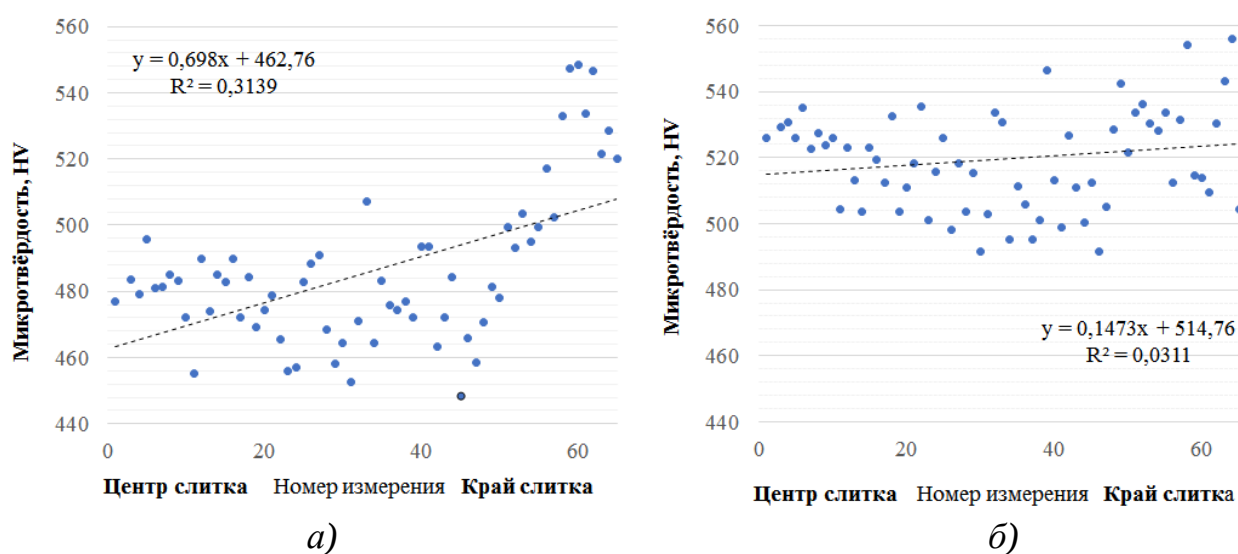


Рисунок 1. Значения микротвёрдости слитков, полученных по технологии:
а – классической технологии переплава; *б* – с применением вращения
 переплавляемого электрода

В третьей главе представлены результаты математического моделирования теплового поля при развитии центробежных сил в шлаковой и металлической ванне при реализации переплава с вращением расходуемого электрода.

Характеристики металла и структуры слитков

Параметр	Слиток без вращения электрода		Слиток с вращением электрода	
	центр	край	центр	край
ρ , г/см ³	7,73	7,29	7,71	7,70
Размер дендритной ячейки, мкм	56,4	33,2	31,6	29,2
σ_B , МПа	898,8	943,2	962,1	993,6
σ_T , МПа	694,9	742,3	734,8	803,8
КСУ, Дж/см ²	37,0	35,2	49,3	50,9

Визуальная схема модели представлена на рис. 2.

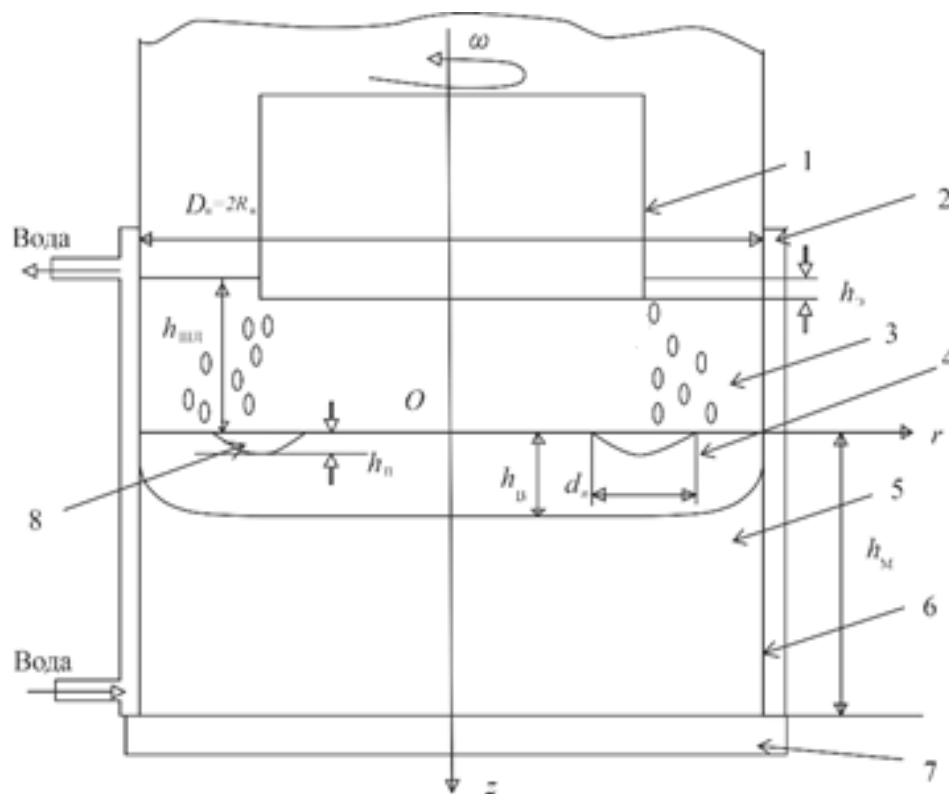


Рисунок 2. Схема электрошлакового переплава с вращающимся электродом и выбранная система координат: 1 – вращающийся переплавляемый электрод;

2 – кристаллизатор; 3 – расплавленный шлак; 4 – ванна жидкого металла; 5 – затвердевший металл (слиток); 6 – слой твердого шлака; 7 – нижнее основание (поддон); 8 – область ванны, куда попадают капли металла с электрода

При моделировании теплового поля приняты следующие допущения:

- для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\phi = 0$);
- тепловой режим металлической ванны – квазистационарный, идет непрерывный процесс подачи металла и его кристаллизация, при этом положение линий ликвидуса и солидуса в рассматриваемой системе координат остается

неизменным (система координат движется относительно земли, так как привязана к поверхности жидкой ванны);

- не учитываются конвективные течения металла в ванне;
- температура жидкого шлака постоянна и одинакова во всем объеме из-за его интенсивного перемешивания;
- принято, что все капли металла, попадающие в ванну, имеют одинаковый средний диаметр, скорость и температуру;
- считается известной частота падения капель с электрода, а также закон распределения места падения капель по радиусу ванны;
- высота получаемого слитка существенно больше глубины жидкой ванны.

С учётом принятых допущений расчётная область металлической ванны и основные её размеры представлены на рис. 3.

На основе используемой математической модели и выбранных алгоритмов решения создана программа «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки в установке ЭШП», которая рассчитывает изотермы в объёме формируемой заготовки в зависимости от места доставки капель электродного металла в жидкую металлическую ванну, а также определяет положение линий ликвидуса и солидуса в зависимости от химического состава переплавляемого электрода.

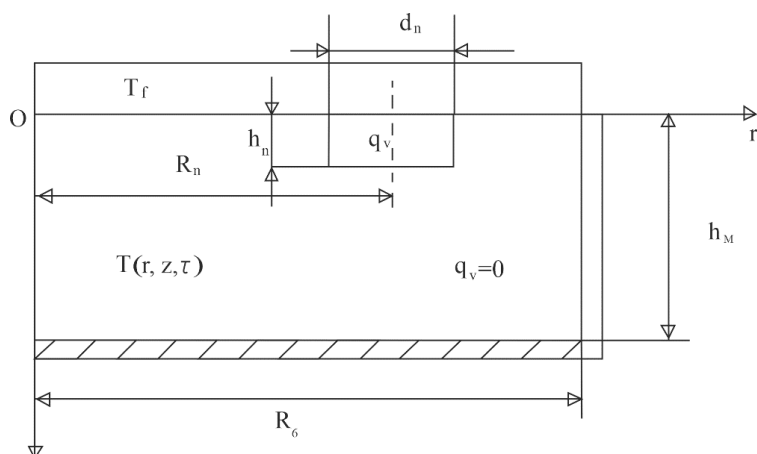


Рисунок 3. Расчетная область к задаче о тепловом состоянии жидкометаллической ванны

Моделирование проведено для условий: диаметр электрода – 40 мм, диаметр кристаллизатора – 90 мм, переплавляемый состав – сталь 30X13. Переменная составляющая – это место доставки капель электродного металла: ось кристаллизатора ($R_K=0$), на $1/3$ радиуса, $1/2$ радиуса, $2/3$ радиуса и вплотную к стенке кристаллизатора (R). Верхняя линия соответствует линии ликвидус и описывает фронт кристаллизации, вторая линия – солидус. Пространство выше линии ликвидус соответствует жидкой металлической ванне и описывает её геометрию. Нижняя точка линии ликвидус соответствует максимальной глубине металлической ванны. Из рис. 4 следует, что смещение места доставки капель электродного металла к стенке кристаллизатора изменяет глубину жидкой металлической ванны и геометрию фронта кристаллизации.

Влияние на положение фронта кристаллизации оказывает и коэффициент заполнения кристаллизатора ($K_{зап}$). Для определения влияния $K_{зап}$ на глубину

металлической ванны проведено моделирование теплового состояния кристаллизующейся заготовки для кристаллизатора диаметром 90 мм и диаметров переплавляемого электрода 40, 60 и 70 мм. Диаграмма зависимости глубины металлической ванны от диаметра электрода и места доставки капли электродного металла представлена на рис. 5.

Перенос места доставки капель из подэлектродной зоны на $1/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора уменьшает глубину металлической ванны более чем в два раза. Минимальная глубина металлической ванны формируется в случае доставки капель электродного металла на $2/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора, что соответствует половине зазора между электродом и кристаллизатором.

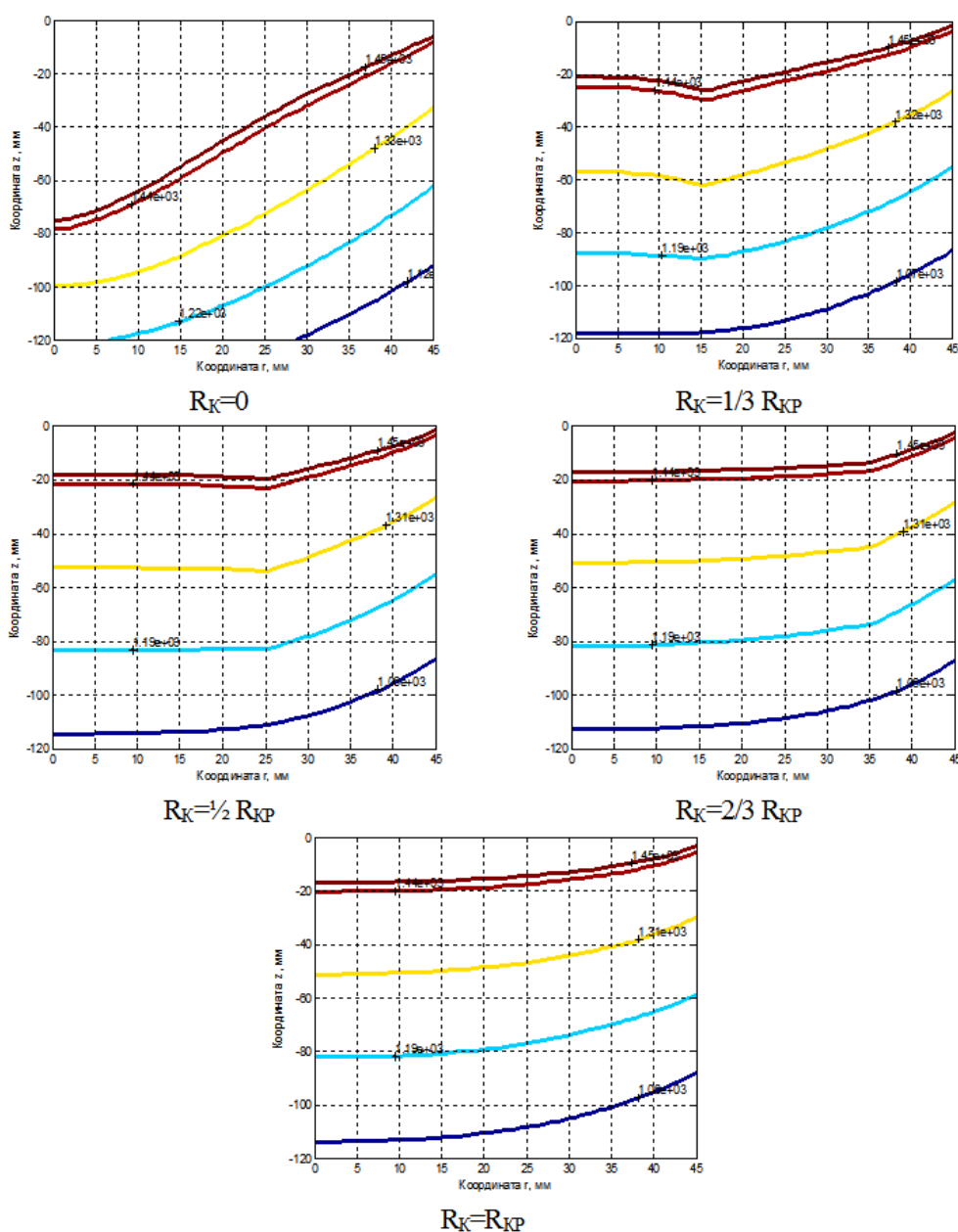


Рисунок 4. Изотермы температурного состояния слитка при $D_{KP} / D_{ЭЛ} = 90 / 40$ мм в зависимости от места доставки капель электродного металла R_K

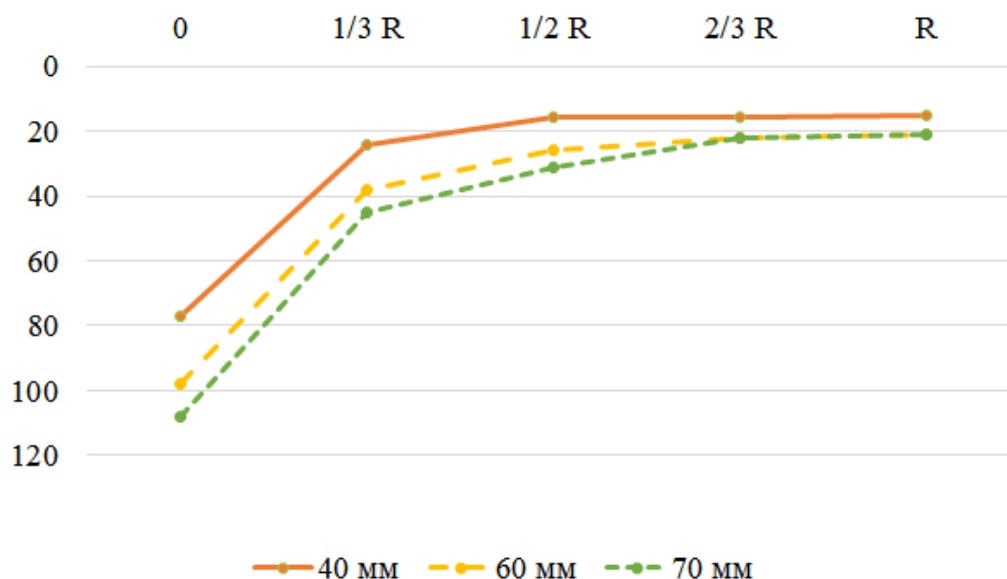


Рисунок 5. Глубина металлической ванны для диаметра кристаллизатора 90 мм в зависимости от диаметра электрода ($D_{\text{э}}$) и от места доставки электродного металла R_K

В четвёртой главе рассмотрен способ получения многослойного слитка с минимальной переходной зоной между слоями. Способ заключается в ведении присадки, корректирующей химический состав металлической ванны, в сочетании с вращением расходуемого электрода по ходу переплава. Опираясь на данные математического моделирования, выбран диаметр переплавляемого электрода 40 мм, диаметр кристаллизатора 90 мм, скорость вращения расходуемого электрода 100 об/мин. По данным моделирования при этих параметрах место доставки капель электродного металла будет обеспечивать формирование минимальной глубины металлической ванны. В качестве добавки, корректирующей химический состав металлической ванны и формирующей высокоуглеродистый слой, выбрана крупка из чугуна СЧ15 размером 1-3 мм. Количество вводимой добавки подбиралось таким образом, чтобы сформировать слой с концентрацией углерода в переплавляемом электроде на 1 % больше, чем исходная. Опытные переплавы проводились с целью проверки адекватности данных математического моделирования о влиянии изменения места доставки капель электродного металла на геометрию жидкой металлической ванны, в частности на её глубину.

Проведено три переплава:

- первый – без вращения, с однократным введением корректирующей углеродсодержащей добавки;
- второй – с вращением расходуемого электрода, с однократным введением корректирующей углеродсодержащей добавки;
- третий – с вращением расходуемого электрода, корректирующая добавка вводилась 7 раз для формирования многослойной структуры заготовки.

Параметры опытных переплавов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры опытных электрошлаковых переплавов

№ переплава	Марка стали электрода	ω , об/мин	Корректирующая присадка (на шлак)	Масса присадки, г
1	30X13	0	стружка СЧ15	500
2	30X13	100	стружка СЧ15	500
3	30X13	100	стружка СЧ15	700
Технологические параметры ЭШП: $D_{\text{Э}} = 40$ мм; $D_{\text{КР}} = 90$ мм; флюс АНФ 6, $I = 800$ А				

Исследование макроструктуры слитков (рис. 6) показало изменение геометрии фронта кристаллизации. Углеродсодержащая корректирующая присадка создаёт градиент концентраций по содержанию углерода в жидкой металлической ванне от 0,32 % до 1,24 %, формируя слой с иными свойствами, в сравнении с материалом переплавляемого электрода.

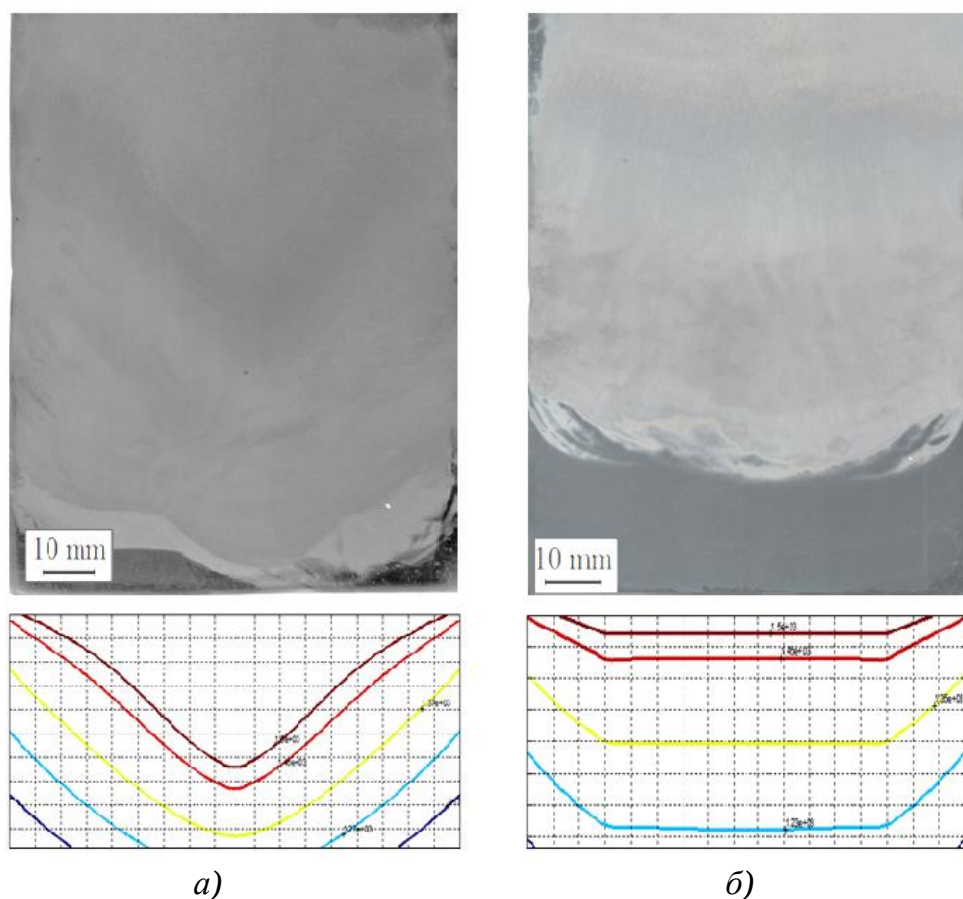


Рисунок 6. Макроструктура слитков, полученных при проведении переплавов 1 (а) и 2 (б)

В случае вращения расходуемого электрода наблюдается более пологая и менее протяженная зона переходного химического состава. Глубина

металлической ванны, в случае переплава без вращения – 78 мм, с вращением – 28 мм. Фронт кристаллизации также становится практически горизонтальным. На рис. 6 показаны макроструктуры полученных слитков, также на рисунке приведены данные математического моделирования теплового состояния кристаллизующейся заготовки и определением положения линий ликвидус и солидус.

Третий слиток осажен и откован до квадрата 35×35 мм, в соответствии со схемой, представленной на рис. 7. Далее проведены исследования химического состава и механических характеристик образцов, взятых из продольного направления прутка (табл. 3). Отметим прочностные характеристики многослойного материала – значения пределов прочности и условного предела текучести при различных видах термической обработки различаются на 4-5 %, что очевидно связано с многослойной структурой материала, сочетающей слои с различным содержанием углерода.

Таблица 3

Механические свойства многослойного материала, полученного методом электрошлакового переплава

Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	HRC	HB	KCU, Дж/см ²
Химический состав многослойного слитка, % мас.: С – 0,4...1,6 %, Cr – 12,5 %, Si – 0,5 %, Mn – 0,25 %						
Отжиг 1030 °С, охлаждение с печью	1011	1042	9	60	626	15
Отжиг 1030 °С, охлаждение с печью; закалка 1050 °С, охлаждение в масле, отпуск при 400 °С	1259	1286	12	64	672	20
30X13 (по ГОСТ 25054-81)	588	735	12	–	235	29

Для проведения усталостных испытаний материала взято две группы образцов, вырезанных в разных направлениях слоёв: группа 1 – образцы с поперечным расположением слоёв, группа 2 – образцы с продольным расположением слоёв (рис. 8). База цикла испытаний $N = 2 \cdot 10^6$. Нагрузки 240, 360, 432, 480 и 720 МПа. По результатам усталостных испытаний построены кривые усталости материала (рис. 9) по методике Басквина. На основании построенных кривых усталости можно сделать вывод, что долговечность образцов из второй группы меньше по причине различной ориентации слоёв.

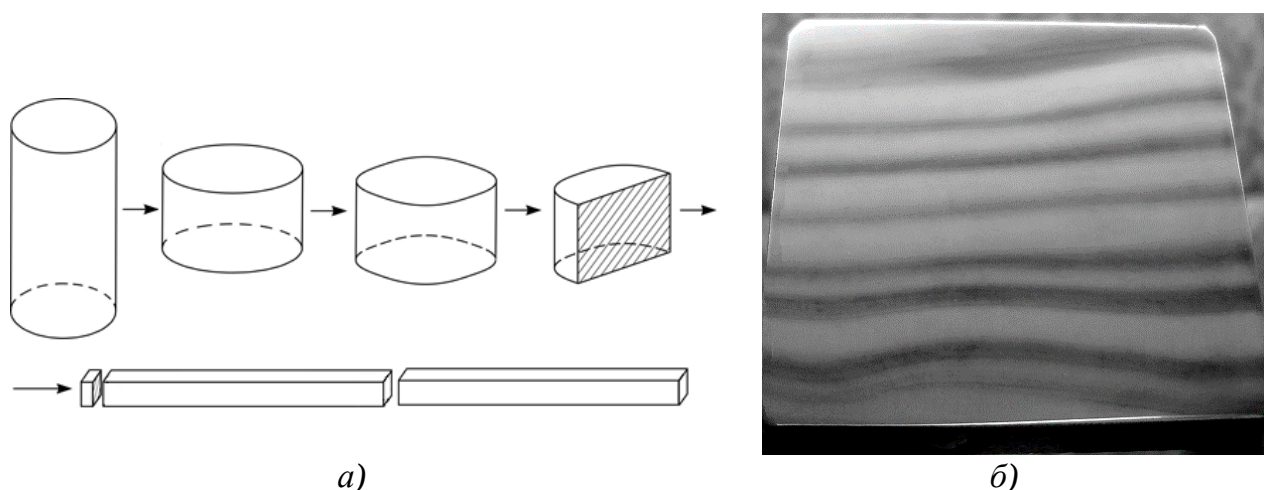


Рисунок 7. Схема обработки давлением и макроструктура многослойного материала слитка 3: *а* – схемаковки до квадрата 35×35; *б* – макроструктура продольного сечения прутка

Пятая глава описывает способ формирования слоя в электрошлаковом слитке за счёт введения специальных частиц, удельный вес которых сравним с удельным весом флюсов ЭШП, или если материал частицы вступает в химическое взаимодействие с флюсом. Корректирующая добавка в предлагаемом способе вводится с поверхности расходующего электрода в каплю электродного металла с последующей доставкой в жидкую металлическую ванну, минуя контакт с флюсом. Способ предполагает нанесение специального покрытия на расходующий электрод. Покрытие, состоящее из связующего компонента и частиц добавки, наносится на электрод в месте, которое после переплава сформирует специальный слой. В качестве добавки применялись WC, TiC и B₄C – эти соединения широко применяются для дисперсного упрочнения и их физико-химические характеристики хорошо изучены. Размер применяемых частиц карбидов: WC – 1...3 мкм, TiC – 1...2 мкм, B₄C – 0,5...1 мкм.

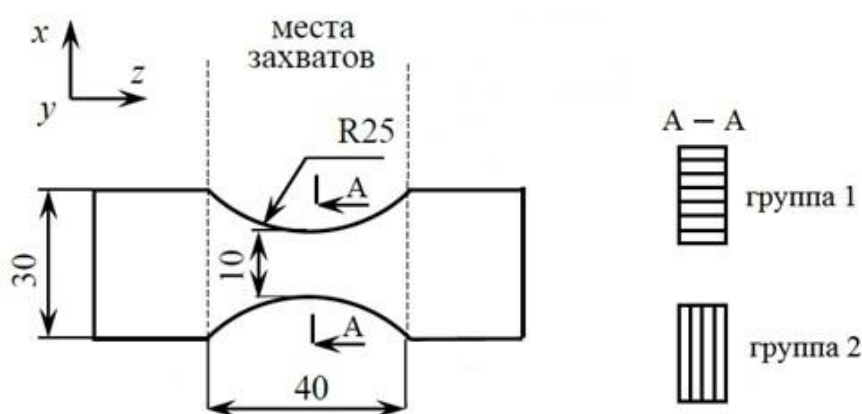


Рисунок 8. Размеры образцов для усталостных испытаний и расположение слоёв в сечении испытываемых образцов

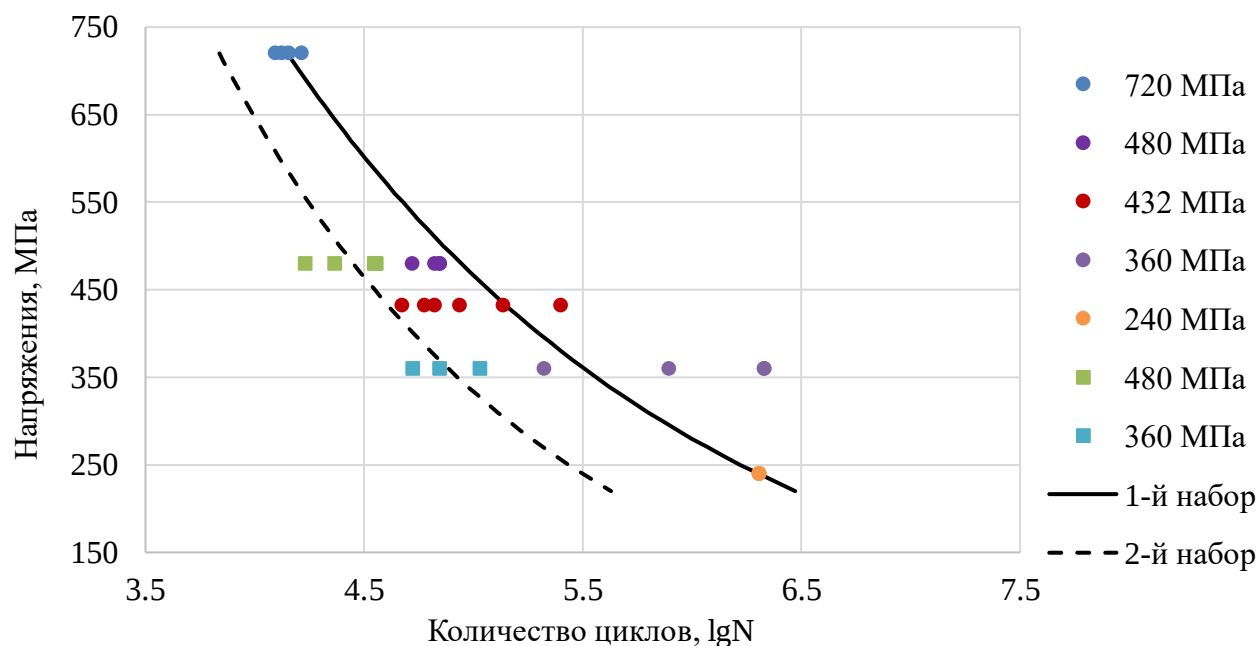


Рисунок 9. Кривые усталости для первого и второго набора образцов по уравнению Басквина

Проведено 15 опытных переплавов, 3 из которых эталонные, с прямой подачей частиц на шлак и вращением электрода (переплавы № 201-э, 206-э, 211-э), а остальные 12 с покрытием, в состав которого вводились корректирующие добавки. Технологические параметры опытных переплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технологические параметры опытных переплавов

№ переплава	Марка стали электрода	ω , об/мин	Корректирующая добавка		Масса присадки, г
			На шлак	В покрытие	
201-э	40X13	64	WC	—	30
202–205	40X13	64	—	WC	30
206-э	40X13	64	TiC	—	30
207–210	40X13	64	—	TiC	30
211-э	40X13	64	B ₄ C	—	30
212–215	40X13	64	—	B ₄ C	30
Технологические параметры ЭШП: $D_{\text{Э}} = 40$ мм; $D_{\text{КР}} = 120$ мм; флюс АНФ 6, $I = 800$ А.					
Химический состав электродов: С – 0,45%, S – 0,015%, P – 0,013%, Si – 0,245%, Mn – 0,45 %, Cr – 12,81%, W – 0,018%, Ti – 0,001%, B – 0,001%					

Исследование химического состава слитков с введением корректирующих добавок (табл. 5) показало следующие результаты: как в эталонных, так и в опытных слитках сформированы области с повышенным содержанием вводимого компонента; усвоение вводимых добавок рассчитывалось с учётом усреднённого

содержания компонента и массы полученного слитка; процент усвоения материала присадки выше в случае введения по технологии со специальным покрытием расходуемого электрода; усвоение карбида вольфрама в случае прямой подачи на шлак и вращения расходуемого электрода составляет 52 %, при введении карбида с помощью специального покрытия электрода – 85 %, для карбида титана – 22,4% и 55,7% соответственно; карбид бора усвоился на 12,7 % и 24,6% соответственно; содержание элементов в слоях равномерное по сечению, а разница в содержании от осевой части слитка к краю составляет 5-7 % (табл. 6).

Исследование образцов методом электронной сканирующей микроскопии показало, что вольфрам находится как в растворённом виде, так и в виде единичных карбидов. Титан представлен нитридами, карбонитридами и также частично растворён в металле. Бор находится в растворённом состоянии. Определение элементов корректирующих добавок в объёме полученных слитков показывает принципиальную возможность введения в жидкую металлическую ванну частиц с поверхности расходуемого электрода при условии радиального течения металла на торце расходуемого электрода.

Таблица 5

Химический состав специального слоя опытных слитков,
полученных с введением корректирующей присадки, % мас

№ переплава	C	Si	Mn	Cr	W	Ti	B	% усвоения
WC								
201-э	0,445	0,237	0,420	12,679	0,336	0,001	0,001	52,0
202	0,456	0,344	0,413	12,427	0,557	0,001	0,001	86,3
203	0,446	0,346	0,429	12,727	0,573	0,001	0,001	88,9
204	0,453	0,347	0,416	12,767	0,529	0,001	0,001	82,0
205	0,440	0,344	0,416	12,707	0,546	0,001	0,001	84,6
TiC								
206-э	0,443	0,241	0,433	12,721	0,016	0,124	0,001	22,4
207	0,438	0,293	0,446	12,684	0,015	0,295	0,001	53,4
208	0,440	0,286	0,432	12,725	0,015	0,291	0,001	52,7
209	0,451	0,270	0,432	12,702	0,017	0,310	0,001	56,1
210	0,441	0,252	0,421	12,683	0,016	0,334	0,001	60,4
B ₄ C								
211-э	0,439	0,238	0,419	12,427	0,012	0,002	0,067	12,7
212	0,446	0,347	0,416	12,767	0,013	0,001	0,131	24,7
213	0,443	0,344	0,416	12,707	0,012	0,001	0,140	26,4
214	0,441	0,34	0,415	12,588	0,010	0,001	0,129	24,3
215	0,451	0,33	0,413	12,567	0,012	0,002	0,121	22,9

Таблица 6

Распределение элементов в радиальном сечении специального слоя, % мас

W, %				
№ переплава	Край	1/2 R	Центр	Среднее в слое
201-э	0,353	0,348	0,307	0,336
202	0,522	0,579	0,571	0,557
203	0,617	0,562	0,542	0,573
204	0,584	0,501	0,505	0,529
205	0,571	0,527	0,541	0,546
Ti, %				
№ переплава	Край	1/2 R	Центр	Среднее в слое
206-э	0,133	0,120	0,117	0,124
207	0,312	0,289	0,283	0,295
208	0,314	0,282	0,276	0,291
209	0,331	0,297	0,303	0,311
210	0,360	0,327	0,313	0,334
B, %				
№ переплава	Край	1/2 R	Центр	Среднее в слое
211-э	0,074	0,063	0,063	0,067
212	0,141	0,125	0,124	0,131
213	0,149	0,134	0,135	0,140
214	0,135	0,123	0,127	0,129
215	0,130	0,118	0,113	0,121

Актуальность дальнейших исследований по введению частиц с поверхности расходующего электрода при электрошлаковым переплаве подтверждается поддержкой темы диссертационных исследований проектом РНФ № 25-29-00245 «Кинетика взаимодействия дисперсных частиц с металлическим расплавом при формировании многослойных материалов».

Общие выводы

1. Экспериментально подтверждено, что реализация технологии вращения расходующего электрода повышает качество формируемого слитка. Сравнение характеристик слитков, полученных по технологии с вращением электрода и без, показало, что вращение приводит к повышению рафинирующей способности ЭШП от неметаллических включений до 75 % в сравнении с классической одноэлектродной схемой без вращения. Показано, что в случае переплава с вращением расходующего электрода наблюдается рост показателей: плотности на 2,6 %, микротвёрдости на 6,8 %, механических характеристик (σ_B +6,1 %, σ_T +7,0 %, KCU +38,7 %) в сравнении со слитком, полученным переплавом без вращения расходующего электрода. Размер дендритной ячейки уменьшается на 26,9 %. Возрастает однородность перечисленных характеристик в поперечном направлении слитка.

2. Установлено, что минимальная глубина металлической ванны формируется в случае доставки каплей электродного металла на $2/3$ радиуса в сторону стенки кристаллизатора, что соответствует половине зазора между электродом и кристаллизатором.

3. Обоснован технологический подход, позволяющий влиять на формирование фронта кристаллизации жидкой металлической ванны и позволяющий уменьшать протяженность переходной зоны между слоями на 65 % при переплаве электрода диаметром 40 мм, кристаллизаторе 90 мм и скорости вращения электрода 100 об/мин.

4. Получен экспериментальный многослойный слиток с уменьшенной протяженностью переходной зоны. Выполнены исследования структуры, прочностных механических характеристик и усталостные испытания экспериментального многослойного материала.

5. Проведена серия экспериментальных переплавов по получению опытных слитков с введением в жидкую металлическую ванну добавок WC, TiC, B₄C через каплю электродного металла при технологии переплава с вращением расходуемого электрода. Установлено, что процент усвоения карбида вольфрама составляет 85 %, карбида титана – 55,7 %, карбида бора – 24,6 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и международных баз данных

1. Чуманов, И.В. Исследование композиционного материала с многослойной структурой, полученного методом электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов, М.А. Матвеева // Электromеталлургия. – 2011. – № 9. – С. 35–38. **(ВАК)**

2. Матвеева, М.А. Исследование механических характеристик многослойного композиционного материала / М.А. Матвеева, А.Н. Аникеев, И.В. Чуманов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2013. – Т.13. – № 2. – С. 151–153. **(ВАК)**

3. Чуманов, И.В. Исследование структуры и механических свойств многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов, М.А. Матвеева // Электromеталлургия. – 2014. – № 3. – С. 29–33. **(ВАК)**

4. Чуманов, И.В. Исследование структуры переходной зоны в многослойном слитке, полученном методом электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева, М.А. Порсев // Электromеталлургия. – 2015. – № 5. – С.16–20. **(ВАК)**

Перевод Chumanov, I.V. Structure of the transition zone in a multilayer inglot prepared by electroslog remelting / I. V. Chumanov, M.A. Matveeva, M.A. Porsev // Russian Metallurgy (Metally). – 2015. – № 6. – Pp. 490–493. (**Scopus Q3**) – <https://doi.org/10.1134/S003602951506004X>.

5. Чуманов, И.В. Определение микротвёрдости многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 284–286. (**БАК**) – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-4-284-286>

6. Чуманов, И.В. Стабилизация структуры коррозионностойкой стали титаном в ходе электрошлаковой плавки / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева // Металлургия машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 10–12. (**БАК**)

7. Аксёнов, И.А. Влияние параметров процесса ЭШП на степень удаления серы / И.А. Аксёнов, М.А. Матвеева, И.В. Чуманов // Электрометаллургия. – 2018. – № 10. – С. 2–10. (**БАК**).

Перевод. Aksenov, I.A. Influence of the ERL parametrs on the removal of sulfur / I.A. Aksenov, M.A. Matveeva, I.V. Chumanov // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – № 6. – Pp. 601–607. (**Scopus Q3**) – <https://doi.org/10.1134/S003602951906003X>

8. Чуманов, И.В. Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на анизотропию свойств получаемого слитка / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева, Д.В. Сергеев // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 91–96. (**БАК**). – <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-2-91-96>

Перевод. Chumanov, I.V. Influence of electrode rotation in electroslog remelting on the anisotropy of ingot properties / I.V. Chumanov, M.A. Matveeva, D.V. Sergeev // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49. – № 2. – Pp. 77–81. (**Scopus Q2**) DOI: 10.3103/S0967091219020050

9. Математическое моделирование влияния места доставки капель электродного металла на глубину металлической ванны при электрошлаковом переплаве / Г.П. Вяткин, М.А. Матвеева, И.В. Чуманов, И.М. Ячиков // Чёрные металлы. – 2023. – № 10. – С. 10–14. (**БАК K2, Scopus Q3**) DOI:10.17580/chm.2023.10.02

10. Исследование усталостных характеристик многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава / М.А. Матвеева, И.В. Чуманов, А.Е. Ерпалов, К.А. Хорошевский // Чёрные металлы. – 2024. – № 3. – С. 10–14. (**БАК K2, Scopus Q3**) DOI: 10.17580/chm.2024.03.02

11. Матвеева, М.А. Развитие технологии электрошлакового переплава для получения многослойных заготовок // Чёрная металлургия. Бюл. научно-технической и экономической информации. – 2024. – № 5. – С. 13–21. (**БАК K2**) DOI: 10.32339/0135-5910-2024-5-13-21

Публикации в других изданиях

1. Матвеева, М.А. Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на микротвёрдость получаемого слитка / М.А. Матвеева, К.А. Крючкова // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2018. – № 17. – С. 53–59. **(РИНЦ)**

2. Матвеева, М.А. Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на форму металлической ванны / М.А. Матвеева // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2020. – № 19. – С. 44–51. **(РИНЦ)**

3. Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на гидродинамику шлаковой ванны / И.В. Чуманов, И.М. Ячиков, М.А. Матвеева и др. // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. – № 73. – 2021. – С. 121–134. **(ВАК)**

Перевод. Chumanov, I.V. Influence of the consumable electrode rotation during electroslag remelting on hydrodynamics of a slag bath / I.V. Chumanov, I.M. Yachikov, M.A. Matveeva and ets. // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. – No. 73. – 2021. – P. 121–134. **(Scopus Q3)** – <https://doi.org/10.17223/19988621/73/11>

Патенты и свидетельства

1. Пат. 2701698 Российская Федерация, МПК C22B 9/18, C22B 9/187. Способ легирования заготовки при помощи плавящегося электрода с покрытием в процессе электрошлакового переплава / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, М.А. Матвеева, Д.В. Сергеев. – № 2019118563; заявл. 14.06.2019; опубл. 30.09.2019, Бюл. № 28. – 10 с.

2. Пат. № 2761192 Российская Федерация, МПК B22D 23/10, B22D 7/02. Способ получения многослойных слитков методом электрошлакового переплава / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, Д.В. Сергеев, М.А. Матвеева. – № 2021106058; заявл. 10.03.2021; опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34. – 10 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612155 РФ. Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки ЭСП с вращающимся электродом / И.М. Ячиков, И.В. Чуманов, И.В. Портнова, М.А. Матвеева; заявл. 08.02.2021; опубл. 12.02.2021.

Матвеева Мария Андреевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВАННЫ ЖИДКОГО
МЕТАЛЛА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПРОТЯЖЁННОСТИ ПЕРЕХОДНОЙ
ЗОНЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СЛИТКОВ
СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА**

2.6.2 – Metallurgy of black, colored and rare metals

**Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук**

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

**Подписано в печать 24.02.2025. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 20/49.**

**Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.**