

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



МАТВЕЕВА Мария Андреевна

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

2.6.2 – Metallurgia чёрных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Чуманов Илья Валерьевич

Челябинск

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Состояние вопроса | 12 |
| 1.1. Получение многослойных заготовок с использованием электрошлаковой технологии | 18 |
| 1.2. Влияние различных электрошлаковых технологий на геометрию жидкой металлической ванны | 22 |
| 1.2.1. Механическая и ультразвуковая вибрация..... | 25 |
| 1.2.2. Переплав с вращением кристаллизатора..... | 29 |
| 1.2.3. Переплав с продувкой газом или газопорошковыми смесями..... | 30 |
| 1.2.4. Переплав в поле действия электромагнитных сил | 31 |
| 1.2.5. Переплав с токопроводящим кристаллизатором..... | 35 |
| 1.3. Переплав с вращением расходуемого электрода..... | 37 |
| Выводы к главе 1 и постановка задачи | 40 |
| Глава 2. Влияние вращения расходуемого электрода на свойства формируемого слитка | 42 |
| 2.1. Влияние вращения на загрязнённость неметаллическими включениями..... | 43 |
| 2.2. Влияние вращения на структуру слитка..... | 43 |
| Выводы к главе 2..... | 49 |
| Глава 3. Математическое описание тепловых процессов при электрошлаковом переплаве с вращением расходуемого электрода | 51 |
| 3.1. Тепловое состояние жидкой шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве | 52 |
| 3.2. Влияние тепла, вносимого каплями электродного металла, на геометрию металлической ванны..... | 59 |
| 3.3. Программное моделирование теплового поля в жидкой металлической ванне при электрошлаковом переплаве | 69 |
| Выводы к главе 3..... | 78 |
| Глава 4. Получение слитков с минимальной переходной зоной между | |

| | |
|--|-----|
| слоями..... | 80 |
| 4.1. Выбор технологического приёма введения присадок, корректирующих химический состав металлической ванны при электрошлаковом переплаве | 80 |
| 4.2. Апробация способа введения добавок, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, через объём рабочего флюса | 82 |
| 4.3. Определение механических характеристик экспериментального многослойного материала | 88 |
| 4.4. Определение усталостных характеристик материала | 91 |
| 4.5. Практическое применение многослойного материала..... | 99 |
| Выводы к главе 4..... | 102 |
| Глава 5. Ведение добавок, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, с поверхности расходоуемого электрода | 104 |
| 5.1. Обоснование способа введения частиц, корректирующих химический состав, в каплю электродного металла | 104 |
| 5.2. Апробация способа введения частиц, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, через объём рабочего флюса | 109 |
| 5.3. Исследование микроструктуры слитков, полученных по технологии введения корректирующих добавок с поверхности расходоуемого электрода | 114 |
| Выводы к главе 5..... | 118 |
| Заключение | 119 |
| Библиографический список | 121 |
| Приложения | 136 |

ВВЕДЕНИЕ

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 также 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, нанесения 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, 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, а именно: обеспечение необходимого состава ванны жидкого металла формируемого многослойного слитка; большая протяжённость переходной зоны. Принципиальное воздействие на переходную зону с целью снижения её протяжённости остаётся актуальной задачей.

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 следующими грантами: 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, подводимую мощность, глубину 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.

В плане воздействия на фронт кристаллизации наиболее перспективны работы, предметом исследований которых является влияние вращения расходуемого электрода при осуществлении классического одноэлектродного процесса. Данные исследования показали, что наблюдается уменьшение

глубины жидкой металлической ванны и образование плоского фронта кристаллизации за счёт смещения теплового центра. 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 сечении 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 испытываемых 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 в каплю электродного металла при электрошлаковом переплаве для изменения химического состава металлической ванны (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 прокаливания 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 проводились 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 усталостных характеристик 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 теоретическим закономерностями и данными по изучаемой тематике других исследователей, а также ответственным подходом автора к выполнению исследований и обработке первичных данных.

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, их исследование. Анализ и обработка результатов, выявление закономерностей, апробация результатов исследований, написание научных публикаций, инициирование выступлений с докладами на конференциях, подготовка текста диссертации.

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 сталеплавильщиков и производителей металла (ISCON-2021), г. Екатеринбург, 25-27 мая 2021 г.; XVII Международный конгресс сталеплавильщиков 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 странице машинописного текста, содержит 33 рисунка, 34 таблицы, список использованных источников из 139 наименований и 6 приложений.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Одним из основных преимуществ многослойных металлических материалов является экономия дефицитных и дорогостоящих металлов за счёт использования их в виде относительно тонких функциональных слоёв в сочетании с недорогой основой – углеродистой либо низколегированной сталью. В двухслойных сталях толщина плакирующего слоя обычно составляет 5...20 % от общей толщины листа. В работе [1] приводятся следующие данные: для стали типа X18H10T при изготовлении двухслойных листов на 1 т листа экономится порядка 100 кг никеля и 200 кг хрома.

Помимо прямой экономии материалов, композиция даёт возможность сконструировать новый комплекс свойств – сочетать высокие прочностные характеристики с коррозионной стойкостью, стойкостью против истирания и т.п.

Кроме сочетаний металлов с принципиально разными свойствами (так называемыми биметаллами), известны и сочетания, состоящие из сталей, близких по химическому составу. В технологическом плане их преимущество заключается в сходных коэффициентах линейного расширения материалов слоёв, что обуславливает меньшие внутренние напряжения в соединении. В работе [2] описаны и исследованы трёх- и пятислойные композиции (3ВК и 5ВК соответственно), полученные плакированием высокопрочной хромоникельмолибденовой конструкционной стали КВК42 сталями КВК32 и КВК37 (отличающимися несколько меньшим содержанием углерода).

По этим свойствам многослойные стали можно разделить на коррозионностойкие, износостойкие, антифрикционные, электротехнические и термобиметаллы.

Наиболее широкое распространение получили коррозионностойкие металлические композиции на основе 08X13, 08X17T, 08X22H6T, 08X18H10T, 12X18H10T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, в особо агрессивных средах применяются сплавы типа ХН65МВ, ХН65МВУ,

H70МВФ-ВИ, ХН78Т. В качестве металла основного слоя в двухслойных коррозионностойких сталях используют углеродистые конструкционные и низколегированные стали повышенной прочности типа СтЗсп, сталь 10, 20К, 09Г2, 09Г2С, 16ГС, 10ХСНД, 12ХМ, 10Х2М1 и т.п. Следует отметить, что химический состав сталей 10Х2М1 и 10ХГСН1Д регламентирует непосредственно ГОСТ 10885-85 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая». В качестве материала основного слоя используются конструкционные стали, содержание углерода в которых невысоко – для углеродистой стали оно не превышает 0,24 %, для низколегированной – 0,18 %. Это обусловлено тем, что двухслойные стали зачастую используются для изготовления сварных корпусов сосудов и аппаратов, в связи с чем предъявляются требования к хорошей свариваемости сталей, определяющейся эквивалентным содержанием углерода.

Основным стандартом химического состава сталей и сплавов, применяемых в качестве плакирующего слоя металлической композиции, является ГОСТ 5632-72. Особым требованием к химическому составу металла плакирующего слоя является пониженное содержание углерода либо повышенное содержание стабилизирующих добавок титана или ниобия, что связано с особенностями термической обработки, в процессе которой может происходить обеднение границ зёрен хромом, связанное с его выделением в виде карбидов хрома из-за диффузии и большого сродства углерода к хрому. Выделение карбидов хрома происходит по границам зёрен и повышает чувствительность стали к межкристаллитной коррозии [3].

Область применения двухслойных коррозионностойких листов весьма широка. Основные направления их использования:

- изготовление реакторов крекинга, реформинга и гидроочистки нефтепродуктов (используются композиции 12ХМ + 12Х18Н10Т);
- изготовление сосудов АЭС (22К + 08Х18Н10Т [4]);
- изготовление ответственных трубопроводов для транспортировки агрессивных сред (АЭС, ТЭС);

– изготовление агрегатов для переработки сернистой нефти с использованием листов с плакирующим слоем из стали 08Х13 (20К + 08Х13, 09Г2С + 08Х13, 16ГС + 08Х13 [5]);

– изготовление варочных котлов, резервуаров для отходов, теплообменников, смесителей для бумажной массы в целлюлозно-бумажной промышленности (композиции 09Г2С + 12Х18Н10Т, 20К + 10Х17Н13М2Т);

– изготовление дистилляторных установок, цистерн для воды, ёмкостей, корпусных конструкций в судостроении;

– изготовление железнодорожных котлов, цистерн для перевозки кислот;

– изготовление оборудования молочных заводов, резервуаров для брожения, перегонных кубовых установок, барабанных сушилок, узлов сельскохозяйственной техники.

В *износостойких биметаллах* в качестве основного слоя используется низко- и среднеуглеродистая сталь, в качестве износостойкого плакирующего слоя – высокоуглеродистая сталь типа 6ХС, Х6ВФ, 85ХФ, Х6Ф1, Х12 и др.

Двухслойные инструментальные стали также используются для изготовления разного рода режущего инструмента – бумагорезательных, луцильных, щепальных, мездрильных и других ножей, в том числе ножей для резки металла. Особенности таких ножей является сочетание высоких режущих свойств и вязкости, что особенно важно для машинных ножей, которые испытывают динамические нагрузки в процессе работы.

В агрегатах подготовки стальной полосы используются кромкообрезальные и кромкокрошительные ножи. Как правило, такие ножи изготавливают целиком из сталей 5ХВ2С, 6ХВ2С, ХВГ и т.п. Стойкость ножей в среднем составляет 2-3 рабочие смены, при этом износ выражается в потере 7...10 % массы ножа, после чего нож меняется на новый и отправляется в переплав. Авторы [6] доказали целесообразность изготовления биметаллических кромкообрезных и кромкокрошительных ножей наплавкой на основание из стали Ст3 режущей кромки износостойким сплавом 90Х4М4ВФ. Промышленные испытания биметаллических ножей в условиях

прокатного производства ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» показали увеличение ресурса работы ножей в 2 раза.

Электротехнические биметаллы применяют в качестве проводников и контактных устройств. К проводниковым сталям относят сталемедную и алюминиевомедную проволоку, широко используемую в линиях связи, контактной сети железных дорог, для изготовления выводов радиодеталей и токопроводящих жил разного рода кабелей. Основные преимущества подобной проволоки – меньшая стоимость и существенно большая прочность (по сравнению с медной и алюминиевой проволокой). Контактные биметаллы предназначены для изготовления неразъёмных контактов в электрических цепях (композиции Ti + Cu, сталь + Al, Cu + Al и т.п.), чаще всего они выпускаются в виде лент. Контактные биметаллы обладают теми же достоинствами, что и проводниковые – это экономия дефицитных материалов и повышение механических свойств токоведущих деталей.

Антифрикционные биметаллы предназначены для изготовления вкладышей подшипников скольжения и производятся в виде лент, полос и труб различного сечения. В качестве металла-основы в антифрикционных сталях обычно используются низкоуглеродистые стали, в качестве материала плакирующего слоя – бронзы (БрОФ 6,5-0,15, БрОЦС5-5-5), латуни, баббиты, антифрикционные алюминиевые сплавы (АСМ, АО-20-1, АО-6-1).

Термобиметаллы используются в радиотехнике и электронике. Использование их в этой промышленности основано на способности некоторых биметаллических соединений изгибаться при нагреве, что связано с существенно разными коэффициентами линейного расширения, входящих в композицию материалов. Слой с большим коэффициентом линейного расширения называется активным, с меньшим – пассивным. Производятся термобиметаллы в виде полос и лент толщиной 0,1...2,5 мм, соотношение толщин слоёв в них близко к 1:1. В качестве материала активного слоя используются сплавы 75ГДН, 20НГ, 24НХ, Л62, Л90, 28ХТЮ. Пассивный слой изготавливают из сплавов 36Н, 50Н, 45НХ, 45НТЮ и др.

Слоистые металлические композиции с основным слоем из конструкционной стали и плакирующим (либо плакирующими, если слоёв в композиции больше двух) из коррозионностойкой стали находят применение в тех случаях, когда одновременно с высокими механическими свойствами требуется надёжная коррозионная стойкость металла. Зачастую для многих видов оборудования АЭС, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов биметалл является единственным материалом, обладающим сочетанием высокой коррозионной стойкости и необходимых механических свойств [7]. Так, целесообразно использование двухслойной стали для изготовления сосудов АЭС, при этом очевидно, что к металлу в этом случае предъявляются повышенные требования [8].

Одной из перспективных областей применения многослойных композиций является нефтехимическое машиностроение, в частности производство толстостенных биметаллических сосудов высокого давления – реакторов риформинга нефтепродуктов, реакторов каталитической изомеризации и реакторов гидроочистки дизельных топлив [9].

Существует большое количество способов получения биметаллических материалов, однако далеко не все они, даже при неоспоримых преимуществах некоторых из них, могут быть использованы для изготовления многослойных заготовок. Так, наиболее широко распространённая сварка металлов давлением (прокатка, осадка) не позволяет обеспечить степень обжатия деформируемой двухслойной заготовки (пакета), необходимую для получения прочного сцепления основного и плакирующего слоёв. Для надёжного соединения слоёв необходимо обеспечить 5-7-кратное, а в некоторых случаях и 10-кратное обжатие. На существующем же прокатном оборудовании невозможно обеспечить необходимую степень обжатия двухслойной заготовки подобной толщины [10, 11–17]

В случае получения биметаллической заготовки литъём соединение разнородных металлов происходит за счёт взаимодействия жидкого металла с твёрдым, что может привести к образованию в зоне соединения металлов

плёнок окислов, эвтектик, хрупких фаз, т.е. в этом случае также не будет достигнуто необходимое качество соединения слоёв [18, 19–26].

Такие методы как сварка взрывом и электрошлаковая сварка принципиально позволяют получить высокую сплошность соединения, однако здесь возникает вопрос качества исходных материалов. Очевидно, что для получения толстого биметаллического листа необходимо использовать лист большой толщины в качестве металла-основы [27, 28–33]. Вариант электрошлаковой наплавки принципиально позволяет получить высокую сплошность соединения слоёв, технология, описанная в работах [34, 35], показывает возможность надёжного соединения слоёв, однако приводит к формированию зон с неблагоприятной структурой и требует дополнительных усилий по её устранению, работа [36] подчёркивает возможную диффузию элементов между основным и плакирующим слоем. Вариант вертикальной наплавки также специализирован под тонколистовой прокат или под трубную заготовку. Работа [37] рассматривает вариант электрошлаковой наплавки в токопроводящем кристаллизаторе. Использование различных вариантов электрошлаковой наплавки позволяет получить надёжное соединение слоёв, но ограничивается только двухслойной композицией.

В работе [9] указывается, что листовой прокат металла открытой выплавки толщиной свыше 40 мм характеризуется строчечной макроструктурой с выраженными скоплениями сульфидных и оксидных включений, обуславливающих значительную анизотропию свойств и появление расслоений. При этом с увеличением толщины металла вероятность появления в нём расслоений при изготовлении сварных конструкций резко повышается. Таким образом, использование в качестве основы толстого листа из металла открытой выплавки крайне нежелательно ввиду опасности возникновения в готовом биметаллическом листе расслоений. Использование же металла, подвергнутого рафинирующему переплаву, делает эти методы экономически нецелесообразными, особенно в случае сварки взрывом,

учитывая технические сложности организации процесса и необходимость в рафинирующем переплаве материала обеих соединяемых пластин.

В настоящее время для получения подобного рода заготовок промышленно используется способ электрошлаковой наплавки, который помимо вышеуказанного недостатка имеет определённые ограничения по толщине наплавляемого слоя. Гораздо более широкими возможностями обладает электрошлаковый переплав.

1.1. Получение многослойных заготовок с использованием электрошлаковой технологии

Электрошлаковый переплав (ЭШП), будучи весьма гибким процессом, принципиально позволяет решить поставленную задачу, формируя многослойную заготовку за счёт замены переплавляемого электрода в процессе плавки или переплавом составного по высоте электрода [38, 39–47]. Эти способы позволяют получить наиболее прочное соединение слоёв за счёт соединения металлов в жидком состоянии. Данное обстоятельство позволяет получать двух- или многослойный прокат любой толщины, причём качество соединения слоёв в этом случае не будет зависеть от степени обжата исходной заготовки, а будет обеспечиваться жидкофазным способом соединения композиции. При этом слиток ЭШП характеризуется очень высокой чистотой по неметаллическим включениям, поэтому речи об образовании в слитке скоплений включений идти не может. Многослойный слиток, полученный с использованием технологии ЭШП, характеризуется более высокой коррозионной стойкостью лакирующего слоя по сравнению с коррозионной стойкостью стали открытой выплавки, что обусловлено рафинированием стали в процессе переплава и особенностями её кристаллизации.

Технология получения многослойных (композитных) слитков путём электрошлакового переплава в кристаллизаторе составного

(комбинированного) по высоте электрода из разнородных материалов известна с 70-х гг. XX в. [48, 49].

Электрошлаковый переплав позволяет в процессе плавки влиять на химический состав формируемого слитка за счёт подачи элементов через дозаторы на шлаковую ванну, а также отказаться от комбинированного электрода. Однако практика показала, что в этом случае не представляется возможным гарантировать необходимый композиционный состав в получаемой заготовке, а взаимодействие присаживаемых элементов с рабочим флюсом ведёт к изменению его технологических и металлургических характеристик. Избежать этого можно, если найти способ доставки элементов непосредственно в жидкую металлическую ванну, исключая контакт с рабочим флюсом.

Отдельной проблемой следует считать регулирование протяжённости переходной зоны. Больше внимание данному вопросу уделено в работе [50]. Как показали расчеты и практика стандартного ЭШП, существенно уменьшить зону переменного состава, варьируя технологические параметры переплава, не удастся. Применение ЭШП составного электрода позволяет получить переходную зону лишь с плавным переходом от одного металла к другому, что предполагает относительно большую протяжённость переходной зоны [51].

Для преодоления указанных трудностей были предприняты попытки применить ЭШП со сменой электродов по ходу переплава. Однако в этом случае существенно уменьшить глубину металлической ванны также невозможно. Если же при смене электродов для получения короткой переходной зоны дать возможность частично закристаллизоваться металлу одного состава перед началом плавления металла другого состава, то неизбежно появление неприемлемых поверхностных дефектов и послойной кристаллизации.

Предложенный в Институте электросварки им. Е.О. Патона способ электрошлакового переплава по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) позволяет устранить указанные недостатки [52]. Многочисленные эксперименты

показали, что при этом способе реализации ЭШП в значительной мере разорвана связь между вводимой в шлаковую ванну электрической мощностью и скоростью наплавления слитка. Это означает, что при ЭШП ДС можно существенно (в сравнении со стандартным ЭШП) изменять скорость наплавления слитка и, соответственно, глубину жидкометаллической ванны [53]. Возможности ЭШП ДС для получения слитков переменного по длине химического состава изучали на сталях и сплавах со значительным интервалом кристаллизации. В частности, изготовили модельные биметаллические слитки диаметром 350 мм, в которых к низкоуглеродистой стали приплавляли быстрорежущую сталь и никелевый сплав. Оба эти материала имеют значительный интервал затвердевания. Применение ЭШП ДС позволило получить переходную зону в этих слитках протяженностью менее 100 мм.

Автор [54] считает, что чем выше диаметр выплавляемого слитка, тем эффективнее использование токоподводящего кристаллизатора, а следовательно, и двухконтурной схемы переплава расходуемого электрода.

Технология ЭШП составного электрода не нашла более широкого промышленного применения из-за того, что многослойные слитки, полученные таким способом, характеризуются наличием между смежными слоями протяжённой переходной зоны, состав которой представляет сплав металлов, образующих эти слои, и отличной по своим свойствам от сплавляемых металлов. Фактически, переходная зона представляет собой ещё один слой в многослойной композиции. При этом химический состав этого слоя непостоянен, т.е. изменяется по его высоте, что означает изменение и его свойств. Как показано в работах [55, 56], протяжённость переходной зоны прямо пропорциональна объёму металлической ванны и примерно равна диаметру круглого слитка. Большая протяжённость переходной зоны часто приводит к образованию в этой зоне неблагоприятных структур, по свойствам резко отличающихся от свойств переплавляемых металлов, образующих составные части электрода. При этом толщина переходной зоны неравномерна

по сечению слитка, а её границы повторяют форму жидкометаллической ванны. Само по себе наличие переходной зоны затрудняет получение слоя металла с заданными свойствами требуемой толщины.

В результате прокатки двухслойной заготовки образуется, в сущности, не двухслойный, а трёхслойный лист: основной металл, плакирующий слой и промежуточный слой – электрошлаковый шов между основным и плакирующим слоями. Промежуточный слой в биметаллическом слитке представляет собой сплав металла электрода и некоторого количества материала соединяемых листов, что связано с их неизбежным подплавлением в процессе сварки. Область переходного состава может характеризоваться неблагоприятными структурами и быть концентратором напряжений при дальнейшей обработке давлением [57].

Формирование равномерной по толщине и сечению слитка переходной зоны не представляется возможным по условиям самого процесса. Эта неравномерность обусловлена, как уже было сказано, неодинаковой глубиной жидкометаллической ванны по сечению кристаллизатора, что объясняется условиями процесса ЭШП. Тепло в жидкую металлическую ванну в большей степени доставляется каплями электродного металла. При переплаве электродов малого и среднего сечения съём капель электродного металла происходит с вершины конуса оплавления, по оси электрода. При переплаве электродов большого сечения наблюдается некоторое рассредоточение мест доставки, но в пределах подэлектродной зоны. Тот и другой варианты доставки электродного металла повышают температуру ванны жидкого металла по оси слитка при непрерывном охлаждении периферии ванны водоохлаждаемым кристаллизатором, в связи с чем её глубина в центральной части заметно больше, чем в периферийных зонах.

Для уменьшения химической неоднородности и протяженности зоны сплавления необходимо принятие мер, направленных на уменьшение глубины жидкометаллической ванны и корректировку химического состава переходной зоны путём введения соответствующих добавок.

Меньшей глубины жидкой металлической ванны при электрошлаковом переплаве можно достичь при выплавке по бифилярной и многоэлектродной схемах [58, 59–62]. Они позволяют более равномерно распределить тепловую мощность в шлаковой и металлической ванне, делая её более плоской. Хотя, изготовление электродов небольшого сечения увеличивает себестоимость производимой заготовки, уменьшает коэффициент заполнения и приводит к более сложной конструкции электрошлаковой установки. Учитывая вышесказанное, можно констатировать – управляя геометрией металлической ванны жидкого металла, можно влиять на протяжённость переходной зоны при производстве многослойных заготовок и слитков, получаемых методом электрошлакового переплава.

1.2. Влияние различных электрошлаковых технологий на геометрию жидкой металлической ванны

Строение электрошлакового слитка и его технологические показатели определяются процессом первичной кристаллизации, в частности закономерностями зарождения и роста кристаллов в маточной среде. Изучение этих закономерностей необходимо для обоснования способов активного воздействия на процесс кристаллизации слитка с целью повышения степени однородности литой структуры, измельчения первичного зерна, устранения грубых дефектов слитка. Изучение закономерностей зарождения и роста кристаллов в переохлажденном расплаве ведётся многие десятилетия, начиная с работ Д.К. Чернова [63].

Кристаллизация слитка в установке ЭШП происходит в условиях постепенного направленного снизу затвердевания слитка с непрерывным поступлением в металлическую ванну новых порций металла. Обеспечение направленной кристаллизации облегчается тем, что между слитком и стенкой кристаллизатора находится шлаковая корочка, уменьшающая отвод тепла в радиальном направлении.

Кристаллическая структура слитков ЭШП отличается от структуры обычных слитков следующим:

- в поверхностном слое не образуется зона мелких равноосных кристаллов, вместо нее может быть зона мелких столбчатых кристаллов;
- внутренняя часть слитка имеет зону радиально-осевых столбчатых кристаллов;
- в нижней части слитка столбчатые кристаллы растут вертикально благодаря охлаждающему влиянию поддона;
- слитки практически не имеют усадочной раковины или имеют небольшую раковину, заполненную шлаком.

Кристаллиты в слитках ЭШП отличаются значительно более высоким совершенством относительно металла разлитого в изложницы или на машине непрерывного литья заготовок. Угол разориентировки по фрагменту в зернах ЭШП постоянен ($0,08^\circ$), в электрометалле он меняется от $0,09^\circ$ до $0,13^\circ$. Несмотря на геометрическую разориентацию главных осей дендритов, их образование (рост) при ЭШП происходит путем «наслаивания» кристаллографических плоскостей одинакового типа. В результате такого роста обеспечивается как монокристалльность зерна, так и его ориентация в определенном кристаллографическом направлении [64].

В литом металле ЭШП наблюдаются, как правило, два типа границ: четко выраженные границы между кристаллитами и более тонкие субграницы внутри кристаллитов. Границы между кристаллитами проходят по междендритным объемам и в краевых зонах слитка сохраняют ориентацию в направлении теплоотвода. В металле ЭШП выявляется более правильная форма кристаллитов – в ряде сплавов зерна имеют характерную для ячеисто-дендритной кристаллизации шестиугольную форму. Условия кристаллизации при ЭШП и меньшее развитие внутрикристаллической ликвации обусловили отсутствие зубчатости границ и грубых выделений избыточных фаз на границах между зернами. Особенности кристаллической структуры слитка, полученного электрошлаковым переплавом, является значительная

протяженность главных осей в зоне транскристаллов, упорядоченность в размерах и ориентации дендритных осей в центральной части слитка, а также характерная шестиугольная форма кристаллов металла.

Строение слитка ЭШП и его технологические показатели определяются процессом первичной кристаллизации, в частности закономерностями зарождения и роста кристаллов в маточной среде [65]. Определение влияния этих процессов необходимо для обоснования способов активного воздействия на процесс кристаллизации слитка с целью повышения степени однородности литой структуры слитков из высоко- и сложнолегированной стали и сплавов, измельчения первичного зерна, а также устранения грубых дефектов ликвационного характера, присущих электрошлаковому металлу.

Электрошлаковый переплав характеризуется переносом электродного металла в каплях через шлаковую ванну. Количество этих капель, скорость их отрыва, траектория движения в шлаковой ванне, форма электрода и металлической ванны являются важнейшими характеристиками переплава. Влияя на эти характеристики, можно изменять гидродинамические и кинетические показатели переплава, а, следовательно, влиять на качество металла, себестоимость, структуру и свойства.

В настоящее время множество зарубежных и отечественных исследователей занято разработкой установок для внешнего воздействия на электрошлаковый переплав, их моделированием и изучением. Исследованию закономерностей капельного переноса при ЭШП посвящены работы [66–70]. Установлено влияние основных технологических параметров процесса (тока, напряжения, скорости плавления, рода и полярности тока, диаметра электрода и др.) на размер и время образования капель. Изучено влияние на капельный перенос механических воздействий и ультразвуковых колебаний [71].

Разработка технологии производства многослойных слитков, когда каждый слой имеет свои функциональные возможности, предполагает сохранение преимуществ электрошлакового металла, а вместе с тем и

улучшение показателей производительности, кристаллической неоднородности и рафинирующей способности.

В качестве внешних воздействий при ЭШП можно выделить следующие:

- механическая и ультразвуковая вибрация расходуемого электрода;
- вращение кристаллизатора;
- продувка газом или газопорошковыми смесями;
- действие электромагнитных сил;
- применение токопроводящего кристаллизатора;
- горизонтальное перемещение;
- переплав с вращением расходуемого электрода.

1.2.1. Механическая и ультразвуковая вибрация

Процесс электрошлакового переплава эффективно используется для получения высококачественных слитков. Однако при производстве крупного слитка было обнаружен грубый недостаток в структуре затвердевания и макроликвации [72, 73]. Увеличение интенсивности охлаждения и оптимизация технологических параметров [74] не устранили выраженной разницы между осевой и периферийной частями слитка [75, 76]. Для решения обозначенной проблемы был предложен метод реализации вибрации электрода в процесс ЭШП. Было показано, что колебательное движение между электродом и жидким шлаком помогает получить однородную структуру металла и уменьшает потребление энергии [77, 78]. В. Вебер и А. Джарди в работе [79] предоставили численную модель, имитирующую непрерывный рост слитка.

Авторы работы [80] изучили влияние различных параметров процесса на профили изотерм, температурные поля и форму металлической ванны. В работах [81–83] авторами сделаны значительные успехи в моделировании процесса ЭШП путем разрешения передачи тепла и течения жидкости в шлаке и металле, в том числе с использованием модели k-ε для представления

турбулентной вязкости и турбулентности термальной проводимости в шлаке, и путем решения уравнения Максвелла для электромагнитного силового поля и пространственного распределения скорости джоулевого нагрева в шлаке.

Работа [84] ориентирована на электродинамическое поле и его механические воздействия на границах шлака и жидкого металла. Также найдена работа [85], целью которой является решение сопряжения электромагнитного поля, потока жидкости, теплопередачи и диапазона фаз с вибрацией электрода на основе трехмерной переходной модели. Были сравнены мультифизические поля между стационарным и вибрирующим электродом в процессе ЭШП, а также оценено влияние параметров вибрации. По результатам этой работы следует, что вибрация, наложенная на электрод, позволяет получать более равномерный и регулярный отрыв капли, а также уменьшить объем отрываемой от электрода капли, что позволяет получить улучшенную структуру и свойства слитка за счет большей площади взаимодействия металла со шлаком. Также увеличивается производительность за счет большей скорости отрыва капли, чем при классическом ЭШП.

Используется и комплексное внешнее воздействие. Так, для получения сферической или цилиндрической поверхности металлической ванны высотой больше радиуса электрода этот электрод одновременно с кристаллизатором совершает возвратно-вращательное перемещение с частотой, равной частоте вращения кристаллизатора, в направлении, противоположном направлению вращения кристаллизатора. При этом электрод возвратно-поступательно перемещают параллельно оси перемещения кристаллизатора. В работе [86] авторы пробуют совмещать вибрацию кристаллизатора, осуществляемую с помощью вибрационного стола, и механические колебания электрода. Отмечено также повышение степени рафинирования металла за счет дробления капель и более длительного пребывания в шлаке.

Более широкие возможности относительно воздействия на большие объемы кристаллизующегося жидкого металла имеет ультразвуковая

вибрация. Ультразвуковая обработка при ЭШП имеет ряд особенностей. Они состоят в том, что здесь при выплавке слитка той же массы обработка ультразвуком происходит при несколько меньшей скорости наплавления. Это облегчает возможность получения эффекта измельчения структуры применением упругих колебаний относительно небольшой мощности. Наиболее рациональным методом ввода упругих колебаний с целью обработки кристаллизующегося при ЭШП слитка является метод введения через затравку. Исследованиями влияния ультразвуковой вибрации на структуру слитков ЭШП диаметром 100 мм установлено, что эффективность ультразвукового воздействия зависит от химического состава стали и условий плавки. Так, в работе [87] при исследовании влияния ультразвуковых колебаний на различные марки сталей и сплавов только у сплава ХН60КВМЮ в зонах максимальной интенсивности ультразвуковых колебаний при определенных электрических режимах наблюдалась структурная полосчатость, ненаблюдаемая в других исследованных сталях. Структурная полосчатость представляет собой развитые поперечные полосы, параллельные фронту кристаллизации. Степень развития полосчатости снижается по мере повышения скорости наплавления слитка и при достижении определенных скоростей устраняется. Другой вид обнаруженных только в сплаве ХН60КВМЮ дефектов – мелкие поры, являющиеся результатом кавитационных процессов, развивающихся в жидкой фазе в непосредственной близости от фронта кристаллизации. Металл, закристаллизовавшийся в ультразвуковом поле, обладает более равноосным зерном и равномерным распределением карбидных и карбоборидных фаз. Существенно уменьшается размер микрзерна. Так, средний балл зерна сплава ХН70ВМТЮ для металла контрольной плавки составил 2,75, а для металла, обработанного ультразвуком, – 4,00. По результатам для стали марки Р18 эвтектическая составляющая в электрошлаковом металле обычной выплавки, опоясывая зерна, образует довольно грубую сплошную сетку, в то время как в металле,

кристаллизовавшимся при воздействии ультразвуковых колебаний, эта сетка разорвана и толщина ее значительно меньше.

Улучшение макро- и микроструктуры металла отражается и в повышении его механических свойств. Не уступая контрольным образцам в прочности, металл, обработанный ультразвуком, обладает повышенными характеристиками пластичности и вязкости.

Вместе с тем, результаты металлографических исследований показали, что воздействие ультразвуковых колебаний на процесс кристаллизации снижает эффективность ЭШП с точки зрения очищения металла от неметаллических включений. Это снижение объяснимо изменением условий удаления включений путем всплывания, а также условий протекания окислительно-восстановительных процессов на границе раздела металл-шлак, в частности вследствие изменения температурного поля жидкой металлической ванны.

Следует отметить, что применение ультразвуковых колебаний при ЭШП может вызвать ухудшение формирования поверхности слитков вследствие поражения ее поверхностными вкраплениями шлака и образования поперечных надрывов, что объясняется разрушением шлакового гарнисажа под воздействием ультразвука и попадания небольших количеств шлака в жидкий металл.

При всем своем позитивном влиянии на структуру стали ЭШП (измельчение зерна, равномерное распределение карбидных и карбоборидных фаз, повышение механических свойств (повышаются пластические характеристики, и в целом повышается технологическая деформируемость)) ультразвуковые колебания при ЭШП имеют целый ряд существенных недостатков, таких как: необходимость в мощном источнике колебаний, снижение эффективности ЭШП в плане рафинирования от неметаллических включений, ухудшение поверхности слитков ЭШП (на всех исследуемых сталях марок ХН60КВМЮ, ХН70ВМТЮ, Р18, ШХ15 в работе [88] возможны такие дефекты как структурная неоднородность и поры).

Способ ультразвукового воздействия на электрошлаковый металл может быть рекомендован для отливок сравнительно небольшой массы, для сталей, к которым не предъявляются специальные требования по неметаллическим включениям (например, этот способ нельзя рекомендовать для производства подшипниковых сталей). Основным ограничением применения способов внешнего физического воздействия колебаниями для электрошлаковых отливок большой массы, достигающих десятков тонн, является недостаточная мощность источников этого воздействия.

1.2.2. Переплавление с вращением кристаллизатора

В работе зарубежных авторов [89] исследовано влияние вращения кристаллизатора на размер неметаллических включений, а также скорость переплавления и потребление энергии при ЭШП по бифилярной схеме подключения. В условиях вращения кристаллизатора показано лучшее удаление неметаллических включений за счет большей площади контакта капель металла и более длительным временем взаимодействия жидкого металла и шлака. При этом авторы утверждают, что, когда вращательная скорость кристаллизатора увеличивается от 0 до 28 об/мин, средний размер включений Al_2O_3 постепенно уменьшается. Однако при скоростях более 28 об/мин способность удаления включений уменьшается. Также при скорости от 6 до 28 об/мин установлена более плотная структура слитка и менее выраженная ликвация элементов, что также вызвано движением шлака, который равномерно распределяет температуру по всему объему. Таким образом, эти авторы подтверждают ранее полученные выводы о том, что вращение кристаллизатора может способствовать увеличению скорости переплавления и уменьшению расхода электроэнергии, но определяющим фактором является скорость вращения кристаллизатора.

1.2.3. Переплав с продувкой газом или газопорошковыми смесями

Принудительное перемешивание расплава может быть вызвано механическими силами, струями газов, электромагнитными силами, упругими колебаниями и т. п. В результате такого перемешивания происходит измельчение, обламывание, смывание и оплавление части вторичных ветвей дендритов потоками более горячего расплава. Первичные кристаллы приобретают округлую форму, а обломки их ветвей могут служить центрами кристаллизации [90]. Чем интенсивнее процесс перемешивания расплава, тем сильнее фрагментация растущих дендритов, тем больше эффект измельчения структуры. Преимуществом таких способов внешнего физического воздействия является то, что они не изменяют химического состава металла и не вносят в него посторонних примесей.

Продувка шлаковой ванны газом в значительной мере интенсифицирует процесс переплава, усредняет температуру шлака, приводит к образованию более мелкой металлической ванны и улучшению качества слитка. Известен способ электрошлакового переплава расходуемого электрода, включающий перемешивание расплава шлаковой ванны путем продувки инертного газа через расплав, в том числе через зону плавления расходуемого электрода. Способ реализуют путем подачи инертного газа (аргона) в шлаковую ванну по одному или нескольким каналам, выполненным в теле расходуемого электрода [91]. Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является способ перемешивания шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве, включающий продувку инертного газа через шлаковую ванну, в том числе через зону плавления расходуемого электрода [92].

Есть способ, не требующий изменений в конструкции кристаллизатора, заключающийся во вдувании инертного газа через полость или полости в электроде [93]. Отверстия для подачи газов в полость кристаллизатора обычно образуют путем бурения или с помощью специально купленного

оборудования. Помимо того, что такая технология является очень трудоемкой, особенно при обработке меди, она не обеспечивает отверстия диаметром менее 0,3 мм.

Недостатком продувки шлаковой ванны является заметное снижение температуры шлака при продувке газа, что приводит к увеличению энергозатрат, снижает эффективность усреднения температуры шлаковой ванны и эффективность рафинирующего действия шлака на расплавленный металл электрода и, в конечном счете, снижает качество металла в слитке и качество поверхности выплавляемого слитка.

1.2.4. Переплавление в поле действия электромагнитных сил

В работах [94, 95] показано положительное влияние внешних электромагнитных воздействий на структуру и свойства выплавляемых электрошлаковых слитков. Отмечается, что механизм воздействия магнитных полей заключается в создании в жидкометаллической ванне под действием объемных электромагнитных сил электровихревых течений и вибраций расплава, которые способствуют гомогенизации и измельчению структуры литого металла. Очевидно, что изменение гидродинамической обстановки в шлаковой ванне под действием внешнего магнитного поля влияет на особенности плавления расходуемого электрода и капельный перенос металла. Поэтому исследование данных процессов представляет научный и практический интерес. Высокие материало- и энергоемкость ЭШП в сочетании с высокими температурами и химической агрессивностью шлаковой и металлической ванн осложняют натурные исследования процессов плавления расходуемого электрода и каплеобразования. Поэтому естественным представляется путь физического моделирования этих процессов на «холодных» моделях. Цель работы [96] заключалась в разработке физической модели плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях воздействия внешнего магнитного поля и изучении влияния продольного

магнитного поля на плавление и каплеобразование электродного металла. Результаты экспериментов показали, что внешнее магнитное поле изменяет структуру течений электролита, что, в свою очередь, влияет на особенности плавления электрода. При отсутствии внешнего магнитного поля жидкость в ванне движется преимущественно в вертикальной плоскости (вниз по оси ванны и вверх у стенок емкости). При наложении внешнего продольного поля к этому движению добавляется горизонтальное вращение вокруг оси ванны, в результате чего образуются объемные течения раствора. Появление горизонтальной закрутки жидкости, вероятно, связано с нарушением строгой осевой симметрии процесса (за счет смещения электрода от оси ванны и действия магнитного поля от горизонтальных участков токоподводов) и частичным выпрямлением рабочего тока вследствие электролитических процессов. При отсутствии внешнего магнитного поля зарождение капли происходит преимущественно у вершины конуса оплавления по оси электрода. По мере роста капли, между ней и электродом образуется перемычка, которая постепенно вытягивается и затем разрушается в нижней части. Часть металла, образующего перемычку, задерживается на электроде и вновь растягивается на оплаиваемой поверхности за счет сил поверхностного натяжения. В большинстве случаев в момент разрушения перемычки образуется одна или несколько дополнительных малых капель диаметром менее 1 мм. В жидкости капли движутся преимущественно вертикально вниз по оси ванны. Средняя частота отрыва капель составляет 0,62 Гц при средних значениях диаметра 6,5 мм. В случае наложения внешнего магнитного поля зарождение капли также происходит преимущественно по оси электрода. Однако по мере роста капли под действием горизонтального вращения электролита она постепенно начинает перемещаться по оплаиваемой поверхности электрода и смещаться от его оси. В результате отрыв капель происходит в разных участках на торце электрода и место их падения на дно емкости становится более рассредоточенным. После отрыва капли перемычка, оставшаяся на электроде, закручивается за счет вращения жидкости и затем

разрушается с образованием дополнительных малых капель, количество которых обычно больше, чем в случае отсутствия внешнего поля. Увеличение частоты отрыва капель металла, очевидно, связано с увеличением силы вязкого трения, действующей на каплю в результате движения модельной жидкости. При этом интенсификация гидродинамических течений возле оплаиваемой поверхности электрода также способствует активизации процессов теплообмена на границе двух фаз, что приводит к увеличению скорости плавления электрода. Необходимо отметить, что при ЭШП плотность тока в ванне значительно превосходит используемую при моделировании. В традиционном процессе перегрев электродного металла (разница между температурой шлака и температурой плавления металла) также значительно выше и, соответственно, скорость плавки тоже более высокая. Поэтому в реальном процессе эффекты от воздействия магнитного поля могут проявляться в большей степени. Для оценки адекватности результатов моделирования проводилось сравнение с результатами натуральных экспериментов. Капельный перенос в условиях реального ЭШП изучали с помощью метода осциллографирования, основанном на изменении тока плавки при образовании и отрыве капли. Исследования проводили при выплавке слитков диаметром 65 мм с использованием электродов из технического титана диаметром 35 мм. Полученные данные показывают, что частота отрыва капель (2,64...4,45 Гц) и скорость плавления металла (4,04...4,27 г/с) в натурном процессе существенно выше значений, полученных при моделировании (соответственно 0,62...0,75 Гц и 0,87...0,96 г/с). Тенденции увеличения частоты отрыва капель электродного металла, снижения их массы и повышения скорости плавления при наложении внешнего магнитного поля, полученные на модели, сохранились и при натуральных экспериментах.

В работе [97] описан способ увеличения площади взаимодействия капли со шлаком для увеличения уровня чистоты переплавленного металла по неметаллическим включениям. Суть способа заключается в использовании поперечного статического магнитного поля. В работе исследовано влияние

этого поля при различной мощности на образование капли. Исследования были проведены при различной интенсивности магнитного поля: 0,1 Т; 0,3 Т; 0,5 Т и 0,7 Т. Когда поперечное статическое магнитное поле (ПСМП) действует в процессе ЭШП, периодическая сила Лоренца будет способствовать взаимодействию переменного тока с внешним магнитным полем, вызывая электромагнитную вибрацию. Поле имеет такую же частоту, как переменный ток и влияет на поведение капли при переплаве. В ходе работы выявлено, что при мощности поля 0,5 Т и 0,7 Т форма капли меняется от конуса в сплюснутую каплю под влиянием электромагнитной вибрации, а после этого делится на два тонких цилиндра. Эти два цилиндра делятся на две группы мелких капель. В работе рассматривается электрошлаковый переплав с наложением на шлаковый и металлический расплав реверсивного переменного магнитного поля. Однако наложение реверсивного магнитного поля на расплав помимо положительных моментов имеет и недостатки. Так, при отклонении режима печи ЭШП по току (программирование тока, изменение межэлектродного промежутка вследствие расхода части шлака на образование гарнисажа, наличие конусности кристаллизатора и т.п.) изменяется радиальная составляющая тока электрода в шлаковой ванне, что изменяет подъемную силу при постоянной индукции соленоида.

Вследствие этого интенсивность воздействия реверсивного магнитного поля на расплав различна по высоте слитка и структура металла неоднородна, что значительно снижает эффективность процесса ЭШП.

Итоги работы показывают, что при правильно подобранной мощности внешнего магнитного поля можно уменьшить диаметр капли, тем самым увеличив площадь взаимодействия жидкого металла со шлаком, а также увеличить степень чистоты металла от неметаллических включений.

1.2.5. Переплавление с токопроводящим кристаллизатором

Большие возможности управления глубиной и формой металлической ванны, а следовательно, и структурой выплавляемого слитка, открывает использование различных схем ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе [98, 99–104].

В таком случае кристаллизатор сам по себе является неплавящимся электродом, поддерживающим процесс. Существует два способа осуществления плавки. Первый – использование расходуемого электрода с питанием по двухконтурной схеме, а второй – использование жидкого или некомпактного присадочного материала.

Отсутствие жесткой зависимости между температурным режимом и производительностью процесса позволяет получать практически любую линейную скорость плавки и форму металлической ванны. Это дает возможность бороться с сегрегационными явлениями, уменьшая скорость передела без ухудшения качества поверхности слитка.

Следует отметить, что использование токоподводящего кристаллизатора позволяет организовать принудительное вращение расплава шлаковой ванны, благодаря чему обеспечивается выравнивание температуры по периметру токоподводящей секции и равномерное температурное поле ванны жидкого металла. Схемы ЭШП с использованием токоподводящего кристаллизатора представляются наиболее перспективными для получения слитков из сложнолегированных сталей и сплавов, композиционных слитков и крупных кузнечных слитков.

На процесс плавления расходуемых электродов существенно влияют различные возмущающие воздействия, в частности, электромагнитное [105]. При этом изменяется характер образования капель и их падения при сохранении такого же поведения электрода в шлаке, которое было отмечено выше. В случае плавления в шлаковой ванне бестоковой заготовки вокруг нее формируется область относительно холодного шлакового расплава, т.к., во-

первых, сама заготовка является макрохолодильником, во-вторых, в ней не выделяется теплота в соответствии с законом Джоуля-Ленца, и, наконец, в-третьих, на границе заготовки отсутствует дополнительное тепловыделение, связанное с прохождением тока через контакт шлак-металл, наблюдаемое на расходоуемых электродах. Плотность тока на оплавляемой поверхности заготовки мала из-за малой величины шунтирующего тока, поэтому электродинамические силы практически не оказывают воздействия на стекание пленки металла по торцу и формирование капель. Данный способ имеет специфические особенности, определяемые конструкцией этого устройства. Прежде всего, оно представляет собой секционный нерасходуемый электрод кольцевого типа, к одной (верхней) из секций которого подведено напряжение от источника питания, а нижняя секция является формирующей расплавленный металл, поступающий в нее. Кроме того, токоведущая секция выполнена таким образом, что представляет собой одновитковый индуктор, благодаря чему обеспечивается вращение шлаковой и металлической ванн в горизонтальной плоскости. Как видно из описания данного устройства, осуществляемый в нем электрошлаковый процесс, по сравнению с процессом в обычном кристаллизаторе, имеет существенные отличия. При использовании токопроводящего кристаллизатора работают два электрода (расходуемый и нерасходуемый). Процесс плавления расходоуемого электрода зависит от соотношения токов, проходящих через оба электрода. В то же время, обеспечиваемое токоведущей секцией кристаллизатора вращение шлаковой ванны, может оказывать дополнительное влияние на процесс плавления электрода и характер образования капель, а также их падение с оплавляемого торца электрода. Токопроводящий кристаллизатор позволяет осуществлять плавку заготовки, неподключенной к источнику питания (бестоковая заготовка). Ее плавление зависит как от температуры шлаковой ванны, так и от тока, шунтируемого заготовкой.

Влияние токопроводящего кристаллизатора на процесс плавления электродов и бестоковых заготовок зависит от электрической схемы

подключения к источнику питания, угловой скорости вращения шлаковой ванны, а также от электрической мощности, поступающей в шлаковую ванну через токоведущую секцию кристаллизатора и через электрод либо заготовку. При одинаковой электрической мощности, вводимой в шлаковую ванну, производительность процесса плавания в токопроводящем кристаллизаторе примерно на 33 % выше по сравнению с плавкой в обычном кристаллизаторе.

1.3. Переплав с вращением расходуемого электрода

Обзор вышеперечисленных способов воздействия – механических и ультразвуковых вибраций, вращения кристаллизатора, барботажа шлаковой ванны, электромагнитных сил – показал, что применение внешних воздействий на процесс ЭШП может влиять на отдельные показатели процесса (рафинирующую способность, фронт кристаллизации, производительность и гарантированно сохраняет высокое качество слитка или заготовки), но сопряжено с рядом трудностей технологического плана.

В сравнении с рассмотренными способами воздействия, наибольший интерес представляет вращение расходуемого электрода вокруг собственной оси. Этот способ лишён недостатков, которые имеют все прочие, основной из которых – избирательность воздействия на один из показателей процесса, что приводит к разбалансу совокупности факторов, обеспечивающих высокое качество металла ЭШП. Способ заключается в придании электроду однонаправленного или реверсивного вращения вокруг своей оси или оси ванны при ассиметричном расположении электрода. Вращение электрода приводит к появлению центробежной силы в плёнке оплавляемого металла на торце расходуемого электрода, в результате воздействия которой достигается периферийный отрыв капель металла и рассредоточение места их падения в металлическую ванну. Центробежные силы создают условия для радиального течения металла на оплаваемой поверхности электрода так, что капля формируется на её периферии, где и происходит отрыв от электрода.

Дальнейшее движение капли в шлаковой ванне происходит по траектории, задаваемой величиной центробежной силы, что и определяет место доставки электродного металла в металлическую ванну.

Вращение расходуемого электрода оказывает комплексное позитивное воздействие на показатели переплава. Подробно вопросы влияния вращения расходуемого электрода на процесс электрошлакового переплава рассмотрены в диссертациях В.И. Чуманова и И.В. Чуманова [106, 107]. Опираясь на эти работы, можно выделить основные направления воздействия вращения расходуемого электрода на процесс электрошлакового переплава.

Во-первых, в случае вращения расходуемого электрода на плёнку жидкого металла дополнительно действует центробежная сила, под действием которой центр каплеобразования смещается ближе к боковой поверхности электрода и происходит более эффективный съём жидкого металла, обеспечивается радиальное течение металла с образованием капель и последующего их отрыва с внешнего периметра электрода. Показано снижение массы капель в 1.5...2 раза в сравнении с массой капель при обычном способе переплава.

Во-вторых, показан рост производительности и снижение расхода электроэнергии. Это связано с тем, что вращение расходуемого электрода вокруг собственной оси ведёт к образованию восходящего потока в шлаковой ванне, делая гидродинамическую обстановку в ней более рациональной с точки зрения использования образующегося тепла. Капли электродного металла попадают в металлическую ванну ближе к стенке кристаллизатора, выравнивая температуру ванны. Снижается температурный градиент ванны по сечению.

В-третьих, изменение гидродинамической обстановки в шлаковой и металлической ванне приводит к следующим технологическим изменениям – уменьшению глубины шлаковой ванны, уменьшению глубины и объёма металлической ванны, уменьшению толщины гарнисажа, что иллюстрируется на рис.1.1.

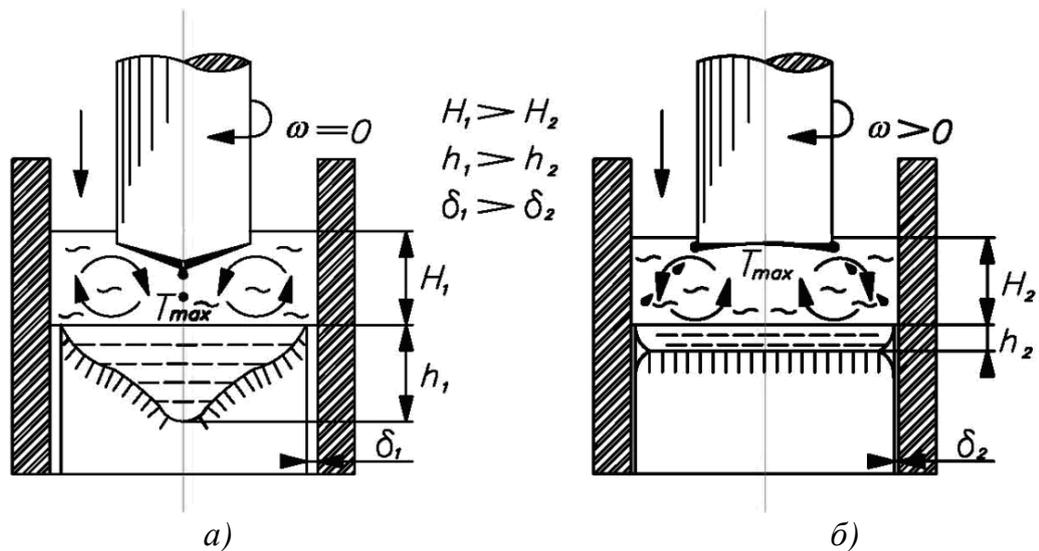


Рис. 1.1. Особенности процесса ЭШП: а) – при классической технологии, б) – с вращением расходуемого электрода: ω – скорость вращения расходуемого электрода, об/мин; T_{max} – эпицентр зоны с максимальной температурой в шлаковой ванне, °С; H_1, h_1 – соответственно высота шлаковой и металлической ванны при принятом процессе, мм; H_2, h_2 – соответственно высота шлаковой и металлической ванны при реализации технологии с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси, мм; δ_1, δ_2 – толщина шлакового гарнисажа при технологии без вращения и с вращением расходуемого электрода, соответственно, мм.

Выбор скорости вращения должен обеспечивать плоский торец электрода и радиальный съём капель электродного металла. Скорость вращения зависит от диаметра расходуемого электрода.

Одной из главных задач при разработке технологии производства многослойных слитков для получения многослойных материалов является формирование плоского фронта кристаллизации в неглубокой ванне жидкого металла. Возможность прогнозировать и обеспечивать в реальных условиях производства требуемую геометрию металлической ванны на протяжении всего переплава позволит получать многослойные слитки с минимальной переходной зоной. Наиболее целесообразно использовать для решения задачи метод электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода.

Для производства многослойного слитка, помимо электрошлакового переплава составного электрода, можно пойти по пути изменения состава жидкой металлической ванны, осуществляя дачу корректирующих добавок через объём рабочего флюса. Такой приём гораздо технологичнее, но не исключает взаимодействия рафинирующей среды с вводимым компонентом. В большей степени его можно использовать, когда удельный вес вводимых добавок превышает удельный вес шлака. В этом случае, быстрое прохождение добавок через объём флюса приведёт к меньшему взаимодействию и изменению их свойств. Следовательно, для расширения использования данного способа необходимо искать возможность введения добавок в жидкий электродный металл, минуя взаимодействие с рабочим флюсом или снижая время взаимодействия до минимального.

Выводы по главе 1 и постановка задачи

Проанализирована информация о химическом составе материалов, применяемых для производства металлических слоистых композиций. Обоснована целесообразность производства многослойных заготовок ответственного назначения методом электрошлакового переплава. Обозначена необходимость формирования минимальной переходной области между слоями разного химического состава.

Показана прямая зависимость между глубиной металлической ванны при электрошлаковом переплаве и размером переходной зоны при формировании многослойной отливки. Проведен анализ литературных данных по способам внешнего воздействия на процесс электрошлакового переплава. Рассмотрена информация об их влиянии на процессы каплеобразования, распределения тепла в шлаковой и металлической ваннах, качестве формируемой заготовки.

Установлено, что наиболее полно решить вопрос воздействия на глубину металлической ванны возможно, используя технологию электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси. Эта

технология позволяет контролируемо изменять место доставки капель электродного металла в металлическую ванну, что приводит к изменению тепловой картины в шлаковой и металлической ванне, а именно – к формированию плоского фронта кристаллизации по сечению кристаллизатора при минимальной глубине металлической ванны.

Для прогнозирования изменения геометрии металлической ванны при воздействии на переплавной процесс центробежных сил, возникающих при вращении электрода, необходимо разработать математическую модель тепловой картины в шлаковой и металлической ванне в зависимости от условий, создаваемых вращением расходуемого электрода.

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 их максимальное усвоение.

Глава 2. ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА НА СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМОГО СЛИТКА

Применение электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода для получения многослойных заготовок является перспективным направлением. Оно прогнозирует возможность объединения рафинирования и улучшения характеристик с технологическим этапом создания многослойной структуры. Однако необходимо определение возможного отрицательного влияния реализации технологии вращения на свойства формируемого слитка. Для этого проведено два переплава – по классической одноэлектродной схеме с вращением и без – с целью исследования и сравнения структуры сформированных слитков.

Для проведения переплавов использована полупромышленная модернизированная установка А-550, оснащённая механизмом вращения электрода. Материал расходуемых электродов – сталь марки 30Х13, флюс АНФ-6. Диаметр электродов – 40 мм, диаметр кристаллизатора – 90 мм, скорость вращения расходуемого электрода – 100 об/мин. Слитки после переплава отожжены 2 часа при температуре 780 °С и охлаждены с печью. Схемы вырезки образцов на рис. 2.1.

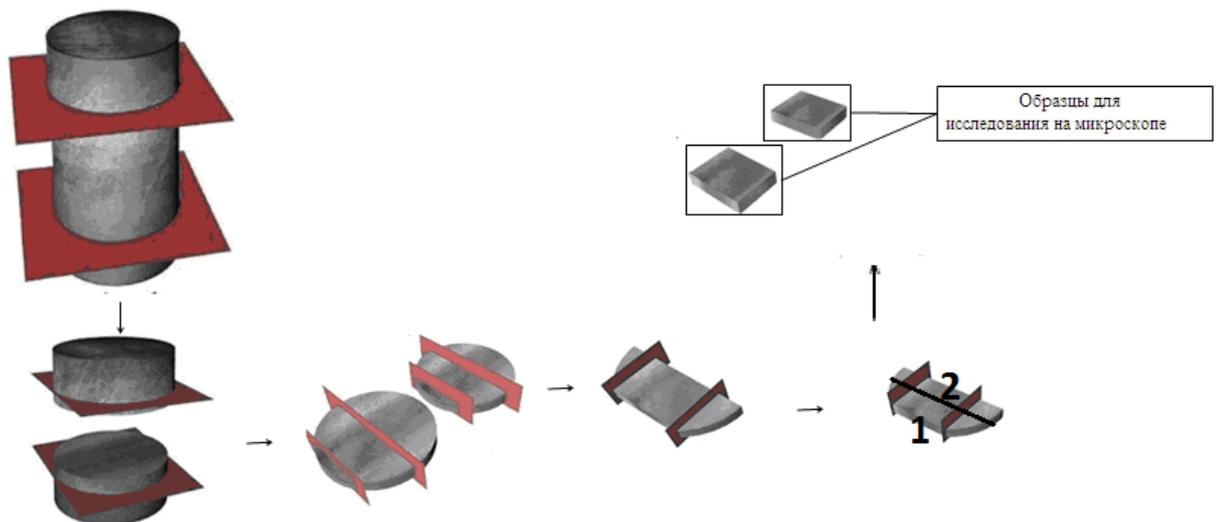


Рис. 2.1. Схема вырезки образцов

Исследование материала полученных слитков велось в двух направлениях: исследование загрязнённости неметаллическими включениями; исследование структурных характеристик (размер дендритной ячейки, микротвёрдость, плотность, пределы прочности и текучести, ударная вязкость).

2.1. Влияние на загрязнённость неметаллическими включениями

Для оценки влияния на рафинирование от неметаллических включений проведён металлографический анализ, в ходе которого велся подсчёт количества включений в 20 полях зрения при увеличении микроскопа $\times 100$. Результаты подсчёта количества включений представлены в табл. 2.1. Исследовались образцы, взятые с расходуемого электрода и из слитков ЭШП, полученных по различным технологиям.

Из данных, представленных в табл. 2.1 следует, что относительно исходного количества включений в материале расходуемого электрода в случае его вращения количество включений снижается на 58 %, в случае переплава без вращения – на 33 %.

Также следует отметить, что при классическом ЭШП в меньшей степени рафинируется металл центральной части отливки, при реализации вращения рафинирование по оси слитка – возрастает. Общее количество включений в центральной части при вращении составляет 347, без вращения – 1015.

2.2. Влияние вращения на структуру слитка

Для выявления влияния вращения расходуемого электрода на свойства формируемого слитка проведены исследования химического состава, микротвёрдости, размера дендритной ячейки, плотности, прочности и ударной вязкости. Исследования проводились на материале из центральной и краевой частей слитков. Исследование химического состава проводилось в двух зонах слитков, а именно в центральной их части и на периферии. Результаты

представлены в табл. 2.2. Оценивалась однородность химического состава в радиальном направлении вертикального сечения слитков.

Таблица 2.1

Подсчёт количества включений в опытных слитках

| № поля зрения | Количество включений на поле зрения, шт. | | | | | |
|---------------|--|------|--------------|------|-------------|------|
| | Электрод | | Без вращения | | С вращением | |
| | Центр | Край | Центр | Край | Центр | Край |
| 1 | 84 | 63 | 48 | 42 | 29 | 53 |
| 2 | 89 | 73 | 53 | 49 | 29 | 62 |
| 3 | 87 | 54 | 58 | 58 | 17 | 47 |
| 4 | 70 | 67 | 47 | 42 | 18 | 39 |
| 5 | 70 | 63 | 53 | 54 | 16 | 51 |
| 6 | 83 | 64 | 55 | 57 | 19 | 73 |
| 7 | 55 | 59 | 49 | 49 | 18 | 49 |
| 8 | 56 | 63 | 59 | 40 | 20 | 29 |
| 9 | 55 | 72 | 46 | 47 | 18 | 64 |
| 10 | 71 | 60 | 58 | 52 | 12 | 23 |
| 11 | 46 | 54 | 49 | 43 | 15 | 28 |
| 12 | 59 | 67 | 58 | 46 | 13 | 24 |
| 13 | 55 | 57 | 57 | 53 | 17 | 29 |
| 14 | 64 | 74 | 47 | 49 | 17 | 23 |
| 15 | 70 | 68 | 53 | 57 | 18 | 26 |
| 16 | 54 | 65 | 45 | 45 | 15 | 34 |
| 17 | 46 | 64 | 41 | 45 | 13 | 27 |
| 18 | 49 | 59 | 46 | 44 | 13 | 25 |
| 19 | 82 | 61 | 48 | 54 | 19 | 22 |
| 20 | 71 | 58 | 45 | 47 | 18 | 28 |
| Всего | 1313 | 1264 | 1015 | 970 | 347 | 751 |
| Всего | 2576 | | 1985 | | 1098 | |

В случае переплава с вращением наблюдается большая однородность по содержанию углерода и хрома в сравнении со слитком, полученным по технологии без вращения.

Химический состав отливок, мас. %

| Образец | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni |
|--|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| Слиток, полученный по технологии с вращением расходоуемого электрода | | | | | | | | |
| Центр | 0,31 | 0,76 | 0,47 | 0,024 | 0,001 | 12,5 | 0,006 | 0,23 |
| Край | 0,31 | 0,75 | 0,47 | 0,020 | 0,002 | 12,9 | 0,006 | 0,26 |
| Слиток, полученный по классической технологии | | | | | | | | |
| Центр | 0,33 | 0,71 | 0,41 | 0,026 | 0,002 | 13,4 | 0,007 | 0,26 |
| Край | 0,32 | 0,73 | 0,42 | 0,024 | 0,002 | 12,7 | 0,006 | 0,24 |

Определение плотности

Определение плотности проводилось методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139-69 при температуре 20 °С на весах ВЛР-200. Значения плотности образцов приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты измерения плотностей

| Образец | Масса на воздухе | Масса в воде | ρ , г/см ³ |
|---|------------------|--------------|----------------------------|
| Технология с вращением расходоуемого электрода | | | |
| 1 центр | 35,55675 | 30,96350 | 7,715 |
| 1 край | 27,38560 | 23,84400 | 7,707 |
| Технология без вращения расходоуемого электрода | | | |
| 2 центр | 29,03400 | 25,28960 | 7,728 |
| 2 край | 28,89310 | 24,94220 | 7,291 |

Определение микротвёрдости

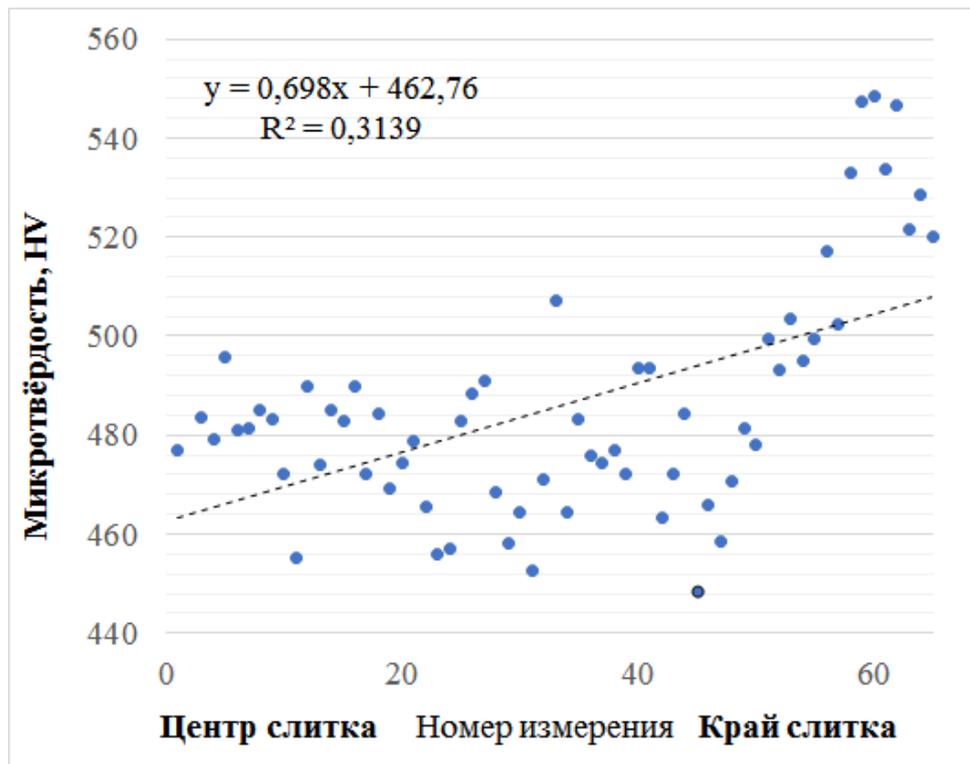
Для исследования использовались продольные темплеты, на которых определялись значения микротвёрдости от оси слитка до края в радиальном направлении путем 65 измерений на каждый образец с шагом 70 мкм. Измерения показали, что усреднённое значение микротвердости образца, полученного с использованием технологии вращения электрода, выше, чем образца, полученного по классической схеме, по всему продольному сечению. Значения микротвердости представлены в табл. 2.4. Для наглядности значения представлены в виде точечных диаграмм с линейной линией тренда (рис. 2.2). Из рисунка следует, что слиток, полученный с применением технологии с вращением расходоуемого электрода, однороднее по исследуемому параметру. Процент отклонения от среднего значения для слитка, выплавленного с

применением технологии вращения, – 6,73 %, для выплавленного по классической технологии без вращения – 9,85 %.

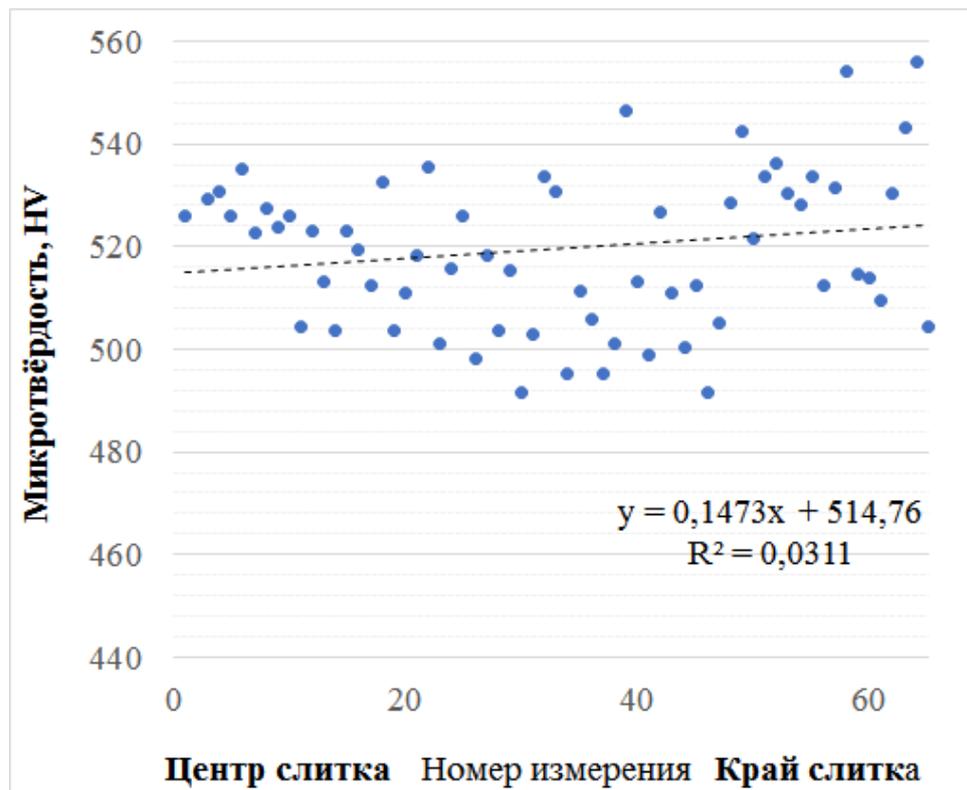
Таблица 2.4

Значения микротвёрдости HV

| № измерения | Значение микротвёрдости | | № измерения | Значение микротвёрдости | |
|-------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------------------|--------------|
| | С вращением | Без вращения | | С вращением | Без вращения |
| 1 (центр) | 525,8 | 476,8 | 35 | 505,7 | 475,9 |
| 2 | 529,1 | 483,6 | 36 | 495,2 | 474,2 |
| 3 | 530,7 | 479,2 | 37 | 500,9 | 476,9 |
| 4 | 525,8 | 495,7 | 38 | 546,3 | 472,3 |
| 5 | 535 | 480,9 | 39 | 513,3 | 493,5 |
| 6 | 522,5 | 481,5 | 40 | 498,8 | 493,6 |
| 7 | 527,6 | 485 | 41 | 526,8 | 463,3 |
| 8 | 523,9 | 483,3 | 42 | 511 | 472,3 |
| 9 | 526 | 472,3 | 43 | 500,5 | 484,5 |
| 10 | 504,5 | 455,1 | 44 | 512,5 | 448,4 |
| 11 | 523 | 489,7 | 45 | 491,7 | 465,8 |
| 12 | 513,3 | 474,1 | 46 | 505,2 | 458,6 |
| 13 | 503,8 | 484,9 | 47 | 528,6 | 470,7 |
| 14 | 523 | 482,9 | 48 | 542,3 | 481,5 |
| 15 | 519,5 | 489,7 | 49 | 521,5 | 478,2 |
| 16 | 512,5 | 472,3 | 50 | 533,8 | 499,5 |
| 17 | 532,7 | 484,2 | 51 | 536,1 | 493,1 |
| 18 | 503,8 | 469,3 | 52 | 530,5 | 503,4 |
| 19 | 511 | 474,4 | 53 | 528 | 495,2 |
| 20 | 518,4 | 478,9 | 54 | 533,8 | 499,5 |
| 21 | 535,4 | 465,4 | 55 | 512,5 | 517 |
| 22 | 500,9 | 455,8 | 56 | 531,4 | 502,3 |
| 23 | 515,6 | 457 | 57 | 554 | 532,8 |
| 24 | 525,8 | 482,8 | 58 | 514,5 | 547,3 |
| 25 | 498,3 | 488,3 | 59 | 514 | 548,3 |
| 26 | 518,2 | 491,1 | 60 | 509,6 | 533,7 |
| 27 | 503,7 | 468,4 | 61 | 530,2 | 546,6 |
| 28 | 515,2 | 458,2 | 62 | 543,3 | 521,5 |
| 29 | 491,6 | 464,5 | 63 | 556,1 | 528,5 |
| 30 | 502,8 | 452,5 | 64 | 504,3 | 520,1 |
| 31 | 533,8 | 471 | 65 (край) | 561,5 | 518,9 |
| 32 | 530,7 | 507,1 | Среднее | 519,8 | 486,5 |
| 33 | 495,2 | 464,5 | Max | 561,5 | 548,3 |
| 34 | 511,5 | 483,4 | Min | 491,6 | 452,5 |



a



б

Рисунок 2.2 – Значения микротвердости слитков, полученных:
 (а) по классической технологии переплава;
 (б) по технологии с применением вращения переплавляемого электрода

Определение размера дендритной ячейки

Расчёт размера ячейки дендрита проводился путём подсчёта пересечений со свободными секущими, в частности методом концентрических окружностей. Для выявления микроструктуры использовался 5 %-ный раствор серной кислоты в спирте. Результаты представлены в табл. 2.5. Размер дендритной ячейки при реализации вращения электрода уменьшился на 27 %.

Таблица 2.5

Размер дендритных ячеек, мкм

| Номер образца | Номер поля зрения | | | Среднее, мкм |
|--|-------------------|------|------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| Технология с вращением расходуемого электрода | | | | |
| Центр | 32,9 | 29,6 | 32,5 | 31,6 |
| ½ r | 35,5 | 32,5 | 32,1 | 33,4 |
| Край | 31,3 | 28,6 | 27,7 | 29,2 |
| Технология без вращения расходуемого электрода | | | | |
| Центр | 45,1 | 57,3 | 63,4 | 56,4 |
| ½ r | 47,6 | 38,1 | 32,5 | 39,4 |
| Край | 31,0 | 38,6 | 29,9 | 33,2 |

Определение механических характеристик

Измерение показателей значения предела прочности и предела текучести проводилось на разрывной машине для испытания конструкционных материалов УТС 110М-5 в соответствии с ГОСТ 1497-2023 «Металлы. Методы испытания на растяжения». Испытания на определение ударной вязкости проводились при помощи маятникового копра ИО 5003-0,3 для испытания металлов и сплавов на двухопорный изгиб (Метод Шарпи) по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Данные сведены в табл. 2.6. Рост значения σ_B составляет 6,1 %, рост σ_T – 7 %, ударная вязкость возрастает на 38 %.

Результаты определения механических свойств слитков

| Слиток | № образца | σ_B , МПа | σ_T , МПа | KCU, Дж/см ² |
|------------------------|-----------|------------------|------------------|-------------------------|
| С вращением электрода | Центр | 962,059 | 734,806 | 49,3 |
| | Край | 993,610 | 803,841 | 50,9 |
| Без вращения электрода | Центр | 898,820 | 694,939 | 37,0 |
| | Край | 943,215 | 742,359 | 35,2 |

Снижение количества неметаллических включений, особенно в центральной части слитка, выравнивание значений микротвёрдости и размера дендритной ячейки, повышение плотности и механических свойств свидетельствуют о положительном влиянии реализации технологии вращения на структуру формируемых слитков.

Выравнивание микротвёрдости и размера дендритной ячейки на опытных образцах, полученных по технологии с вращением расходуемого электрода, по сравнению с общепринятой технологией, объясняется изменением места доставки электродного металла, а именно – ближе к стенке кристаллизатора. При этом капли электродного металла равномерно распределяются по всему периметру кристаллизатора. При правильно подобранных центробежных силах обеспечивается полное радиальное течение металла с оплаваемого торца электрода.

Увеличение плотности металла после ЭШП с вращением расходуемого электрода, при условии сохранения одинакового химического состава, можно объяснить увеличением скорости кристаллизации, которое происходит в результате размывания теплового центра из-за периферийной доставки электродного металла в зону максимального охлаждения (ближе к стенке кристаллизатора).

Выводы к главе 2

1. Технология вращения расходуемого электрода способствует повышению показателей микротвёрдости, плотности и основных механических характеристик (σ_B , σ_T , KCU) при уменьшении размера дендритной ячейки.

2. В случае переплава по технологии с вращением расходуемого электрода наблюдается снижение концентрации неметаллических включений в материале отливки в сравнении со слитком, полученным по традиционной одноэлектродной технологии. Установлена большая рафинирующая способность в осевой части слитка.

3. Показано, что технология вращения расходуемого электрода приводит к росту рафинирующей способности переплава и позволяет повышать качество формируемого слитка.

Глава 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ С ВРАЩЕНИЕМ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА

Вращение электрода вокруг собственной оси приводит к появлению центробежных сил, результатом воздействия которых является радиальное течение электродного металла на оплаиваемой поверхности и, как следствие, периферийный отрыв капель металла от оплаиваемого торца, а также рассредоточение места их падения в металлическую ванну. Из экспериментальных исследований известно, что указанные эффекты позитивно влияют на форму и глубину металлической ванны, а также на направление роста кристаллов [108, 109]. Фронт кристаллизации становится более плоским, что обеспечивает рост кристаллов в осевом вертикальном направлении и даёт возможность получения биметаллических и многослойных заготовок, обеспечивая минимальную переходную зону между сплавляемыми материалами композиции.

Вращение расходуемого электрода инициирует восходящий поток рабочего флюса, т.е. гидродинамика при плавлении вращающегося электрода обратна той, которая имеет место только при вертикальном перемещении электрода. Поднимаясь в подэлектродной зоне, шлаковый поток нагревается и достигает максимальной температуры непосредственно у оплаиваемого торца. В обычной технологии шлак омывает оплаиваемый конус электрода после того, как он отдал своё тепло водоохлаждаемой стенке кристаллизатора, и, двигаясь по подэлектродной зоне, имеет максимальную температуру на границе с жидкой металлической ванной. Съём жидкого электродного металла в случае вращения электрода происходит преимущественно под воздействием центробежных, а не гравитационных сил, что характерно для классической технологии перепада. Следовательно, при плавлении в поле действия центробежных сил жидкая капля металла с оплаиваемой поверхности эвакуируется несколько раньше, в сравнении с оплаиванием без вращения, что позволяет быстрее «готовить» поверхность электрода для последующего плавления.

Попадая в металлическую ванну, капли формируют геометрию её дна. Рассредоточивая место доставки электродного металла при переплаве одного электрода за счёт его вращения, удаётся получить более пологую форму дна жидкой металлической ванны на протяжении всего времени переплава, а следовательно, и фронта кристаллизации.

3.1. Тепловое состояние жидкой шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве

В данной главе представлена математическая модель теплового состояния жидкометаллической ванны установки ЭШП. В модели учтено, что тепло в металлическую ванну поступает перегретыми каплями металла электрода и через поверхность ванны вследствие теплообмена со шлаком. Отбор тепла от металла при его охлаждении и кристаллизации происходит через водоохлаждаемые стенки кристаллизатора и поддона. В качестве металла выступает жидкая сталь, имеющая определенные особенности при кристаллизации, образуя довольно обширную двухфазную зону.

На рис. 3.1 приведена схема электрошлакового переплава с вращающимся электродом в режиме периферийного отрыва капель металла от его оплаваемого торца. Это позволяет локализовать место падения капель в металлическую ванну. На рисунке показана используемая цилиндрическая система координат $O r_z$, ось O_z совпадает с осью ванны, а начало координат находится на ее поверхности.

Принятые допущения:

- для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi=0$);
- тепловой режим металлической ванны – квазистационарный. Считаем, что 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 $T_f = \text{const}$ и одинакова во всем объеме из-за его интенсивного перемешивания;
- все капли металла, попадающие в ванну, имеют одинаковый средний диаметр $D_{\text{ч}}$, скорость $W_{\text{ч}}$ и температуру $T_{\text{ч}}$;
- известна частота падения капель с электрода n_0 , а также закон распределения места падения капель по радиусу ванны;
- высота получаемого слитка $h_{\text{м}}$ существенно больше глубины жидкой ванны.

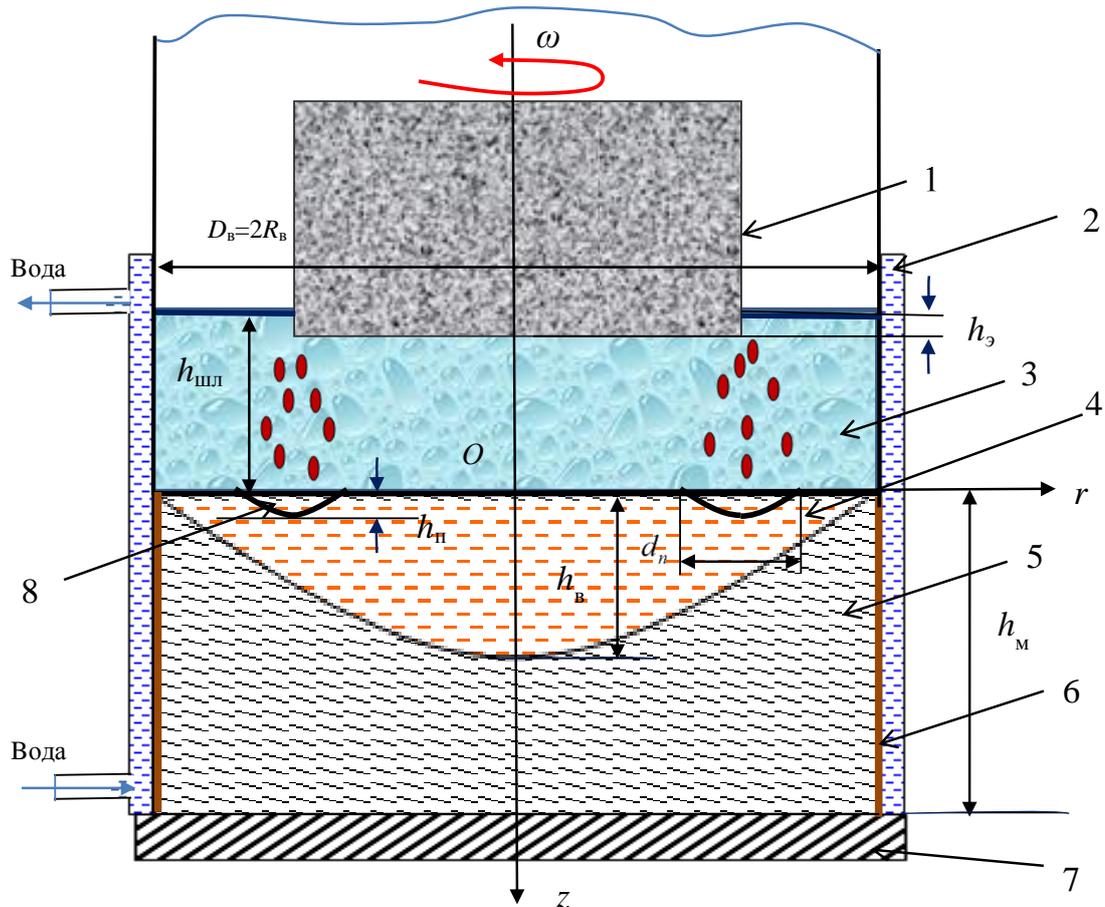


Рис. 3.1. Схема электрошлакового переплава с вращающимся электродом и выбранная система координат:

- 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 для достижения квазистационарного теплового режима ванны используется переход от начального к установившемуся

тепловому состоянию путем решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом фазового перехода со специфическими граничными условиями.

Распределение температуры в твердой, двухфазной и жидкой области ванны описывается одним уравнением теплопроводности [110]. В этом уравнении учитываем выделение тепла кристаллизации согласно теории квазиравновесной двухфазной зоны ($\tau > 0, 0 \leq r \leq R_g, 0 \leq z \leq h_m$)

$$c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial \tau} - \rho_m L \frac{\partial g}{\partial \tau} = \lambda_m \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где $T(r, z, \tau)$ – температура; τ – время; $g(T)$ – доля твердой фазы в зависимости от температуры; $q_v(r, z, \tau)$ – мощность внутренних источников теплоты (учитывает тепло, поступающее с перегретыми каплями металла электрода), Вт/м³.

$R_g = D_g / 2$ – внутренний радиус кристаллизатора (радиус металлической ванны).

При использовании подстановки $\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\partial g}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}$ уравнение (1) примет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_m}{c_{эф} \rho_m} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_{эф} \rho_m}. \quad (2)$$

Оно также пригодно для описания всей металлической ванны в целом, без выделения границ твердой, двухфазной и жидкой зон.

Теплофизические свойства металла, находящегося в ванне, описываются следующими кусочно-непрерывными функциями:

– коэффициент теплопроводности

$$\lambda_m = \begin{cases} \lambda_{мж} \cdot \varepsilon_k & \text{при } T > T_L; \\ \lambda_{мт} g + \lambda_{мж} (1 - g) & \text{при } T_S \leq T \leq T_L, \\ \lambda_{мт} & \text{при } T < T_S; \end{cases} \quad \begin{matrix} g = 0; \\ 0 < g < 1; \\ g = 1; \end{matrix} \quad (3)$$

– ПЛОТНОСТЬ

$$\rho_M = \begin{cases} \rho_{MЖ}, & \text{при } T > T_L; \\ \rho_{MT}g + \rho_{MЖ}(1-g), & \text{при } T_S \leq T \leq T_S, \quad 0 < g < 1; \\ \rho_{MT}, & \text{при } T < T_S. \end{cases} \quad (4)$$

– удельная теплоемкость

$$c_{эф}(T) = \begin{cases} c_{MЖ}, & \text{при } T > T_L; \\ c_{MT}g + c_{MЖ}(1-g) - L \frac{dg}{dT}, & \text{при } T_S \leq T \leq T_L, \\ c_{MT}, & \text{при } T < T_S. \end{cases} \quad (5)$$

где $\lambda_{MЖ}$, λ_{MT} – теплопроводность жидкого и твердого металла; $\rho_{MЖ}$, ρ_{MT} – плотность жидкого и твердого металла; ε_k – увеличение коэффициента теплопроводности за счет циркуляции и турбулизации расплава; $c_{MЖ}$, c_{MT} – удельная теплоемкость жидкого и твердого металла.

Теплофизические свойства стали, используемые при моделировании теплового состояния ванны, сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Теплофизические свойства металла, используемые при моделировании

| № | Величина | Обозначение | Величина | Единица измерения |
|---|--|----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | Плотность жидкого металла | $\rho_{MЖ}$ | 7000 | кг/м ³ |
| 2 | Плотность затвердевшего металла | ρ_{MT} | 7800 | кг/м ³ |
| 3 | Удельная теплоёмкость жидкого металла | $c_{MЖ}$ | 585 | Дж/(кг К) |
| 4 | Удельная теплоёмкость затвердевшего металла | c_{MT} | 600 | Дж/(кг К) |
| 5 | Коэффициент теплопроводности жидкого металла | $\lambda_{MЖ}$ | 46,5 | Вт/(м К) |
| 6 | Коэффициент теплопроводности затвердевшего металла | λ_{MT} | 40 | Вт/(м К) |
| 7 | Теплота плавления | L | 272 | кДж/кг |
| 8 | Кинематическая вязкость жидкого металла | ν_M | $7 \cdot 10^{-7}$ | м ² /с |
| 9 | Число Pr | Pr_M | 0,06 | – |

| | | | | |
|----|---|-----------------|-----|---|
| 10 | Увеличение коэффициента теплопроводности за счет циркуляции и турбулизации расплава | ε_k | 1,2 | — |
|----|---|-----------------|-----|---|

Для тепловой задачи количество твердой фазы в интервале затвердевания определяем по модели линейного закона $g = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$, из которого можно получить $\frac{dg}{dT} = -\frac{1}{T_L - T_S}$, где T_L, T_S – температуры ликвидуса и солидуса соответственно. В зависимости от химического состава стали (для $[C] < 2,14\%$) температуры ликвидуса и солидуса могут быть определены по следующим эмпирическим уравнениям:

$$T_L = 1537 - (88 \cdot [C] + 8 \cdot [Si] + 5 \cdot [Mn] + 4 \cdot [Cu] + 5 \cdot [Cr] + 25 \cdot [S] + 30 \cdot [P]), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (6)$$

$$T_S = 1537 - (20[C] + 16[Si] + 6[Mn] + 93[P] + 110[S] + 1,7[Cr] + 3,9[Ni]), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7)$$

С учетом принятых допущений расчетная область ванны, а точнее половина ванны, и основные ее размеры показаны на рис. 3.2.

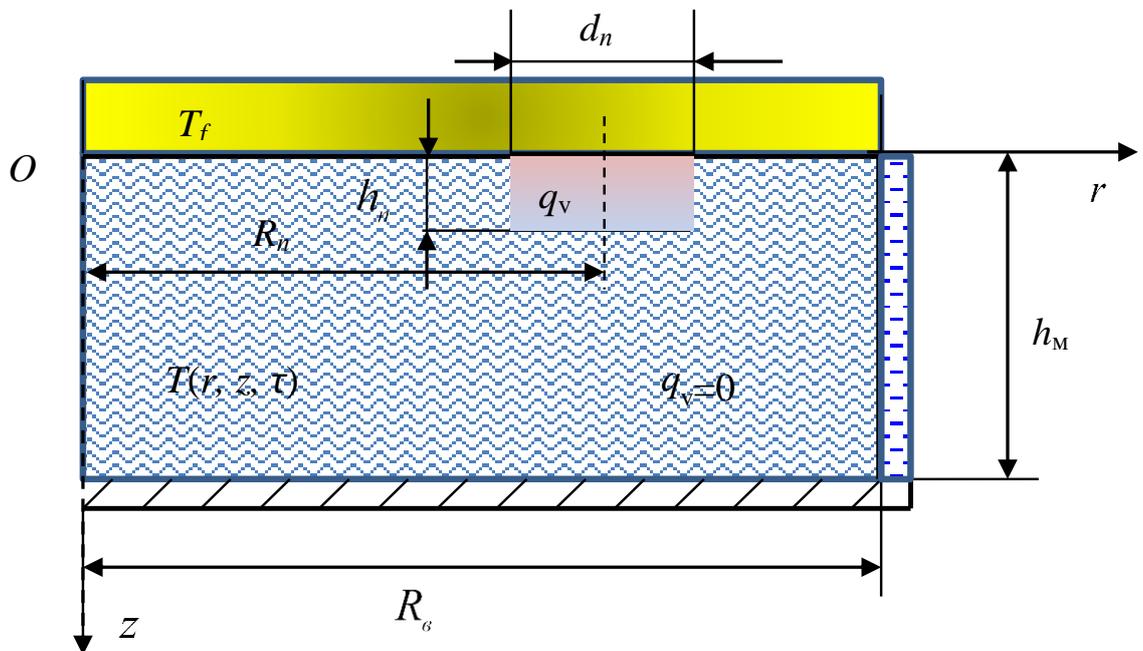


Рис. 3.2. Расчетная область к задаче о тепловом состоянии жидкометаллической ванны

Для решения дифференциального уравнения (2) его необходимо дополнить краевыми условиями.

Начальные условия

При расчете квазистационарного теплового состояния слитка неважно начальное распределение температуры. Однако, чем ближе оно к расчетному распределению, тем быстрее система достигнет установившегося состояния. В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках жидкой расчетной области формируемого слитка выше температуры ликвидуса на ΔT_0

$$\text{(для } 0 \leq z \leq h_b, 0 \leq r \leq R_g) \quad T(r, z, 0) = t_0 = T_L + \Delta T_0, \quad (8)$$

где h_b – ориентировочная глубина жидкой ванны. В остальной части расчетной области температура ниже солидуса на ΔT_0 ;

$$\text{(для } h_b < z \leq h_m, 0 \leq r \leq R_g) \quad T(r, z, 0) = t_0 = T_s - \Delta T_0. \quad (9)$$

Граничные условия

На оси ванны условие осевой симметрии (для $r=0, 0 \leq z \leq h_m$)

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (10)$$

На внутренней стенке кристаллизатора имеем граничное условие 2 рода (для $r = R_g, 0 \leq z \leq h_m$):

$$q_{\text{бок}} = -\lambda_m \frac{\partial T(r, z)}{\partial r}, \quad (11)$$

где $q_{\text{бок}}$ – тепловой поток в кристаллизатор, который определяем из уравнения теплопередачи:

$$q_{\text{бок}}(z) = \frac{k_{\text{тст}} \cdot (T(R_g, z, \tau) - t_g)}{2\pi \cdot R_g}, \text{ Вт/м}^2, \quad (12)$$

$t_g = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ – средняя температура охлаждающей воды.

Коэффициент теплопередачи через кристаллизатор $k_{\text{тст}}$ находится как величина, обратная сумме термических сопротивлений: гарнисажной пленки, медной стенки кристаллизатора и теплоотдачи к охлаждающей воде (Вт/м)

$$k_{\text{тст}} = \frac{1}{\frac{\delta_{\text{шл}}}{\lambda_{\text{шл}}} + \frac{\delta_{\text{ст.р}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{с}}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}), \quad (13)$$

где $\delta_{\text{шл}} \approx 1,1-1,5$ мм – толщина затвердевшего шлака на поверхности кристаллизатора; $\lambda_{\text{шл}} \approx 2$ Вт/(м К) – коэффициент теплопроводности твердого шлака; $\delta_{\text{ст.р}} = 20$ мм, $\lambda_{\text{ст}} = 270$ Вт/(м·К) – толщина и коэффициент теплопроводности медной стенки кристаллизатора соответственно; $\alpha_{\text{с}} \approx 12\,000$ Вт/(м² К) – коэффициент теплоотдачи от стенок кристаллизатора к охлаждающей воде.

По данным, приведенным в работе Клюва М.М. [110], полное термическое сопротивление передачи тепла через стенку кристаллизатора составляет $R_{\text{тст}} = 1/k_{\text{тст}} = 3,39$ м²·К/Вт или $k_{\text{тст}} = 0,295$ Вт/(м²·К). По данным [116] – $k_{\text{тст}} = 0,900$ Вт/(м²·К). При этом тепловой поток в кристаллизатор

$$q_{\text{док}} = \frac{1}{R_{\text{тст}}} (T(R_{\text{с}}, z, \tau) - t_{\text{с}}) = k_{\text{тст}} (T(R_{\text{с}}, z, \tau) - t_{\text{с}}). \quad (14)$$

На границе жидкого металла и флюса можно задать граничное условие четвертого рода (при $z = 0$, $0 \leq r \leq R_{\text{с}}$)

$$\frac{\partial T}{\partial z} \lambda_{\text{мж}} = \frac{\partial T_f}{\partial z} \lambda; \quad T(r, 0, \tau) = T_f(r, 0, \tau),$$

где T_f , λ – температура флюса и его коэффициент теплопроводности.

Однако из-за того, что рассчитывается распределение температуры в шлаковой ванне, определить производную $\partial T_f / \partial z$ не представляется возможным. Жидкий флюс движется вдоль поверхности металла, имея среднюю температуру T_f . Физически правильным в этом случае будет

постановка на границе жидкого металла и флюса граничного условия 3 рода (при $z = 0, 0 \leq r \leq R_g$):

$$\alpha_f (T_f - T(r, 0, \tau)) = -\frac{\partial T}{\partial z} \lambda_{мж}. \quad (15)$$

Тепловой поток через границу раздела шлак-металл составляет $q_{шм} \approx 0,4 - 0,8$ МВт/м². При разнице температур $(T_f - T(r, 0, \tau)) \approx 200$ °С можно оценить коэффициент теплоотдачи как $\alpha_f \approx 2 - 4$ кВт/(м² К).

На поверхности поддона, соприкасающейся с твердым металлом (при $z = h_m, 0 \leq r \leq R_g$),

$$q_{под} = -\lambda_{мт} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{R_{тп}} (T(r, h_m, \tau) - t_g) = k_{тп} (T(r, h_m, \tau) - t_g), \quad (16)$$

где $q_{под}$ – тепловой поток, отводимый системой водоохлаждения с нижнего основания, $R_{тп} = 6,27$ м²·град/Вт – полное термическое сопротивление от слитка к охлаждающей воде поддона, $k_{тп} \approx 0,16$ Вт/(м²·К).

3.2. Влияние тепла, вносимого каплями электродного металла, на геометрию металлической ванны

Тепло, вносимое каплями металла в область их падения в ванну, моделируем фиктивными внутренними источниками объемной мощностью q_v .

Рассмотрим случай периферийного отрыва капель металла от оплавленного торца электрода при его вращении. Будем считать, что распределение частоты падающих капель по поверхности ванны металла ($z = 0$) подчиняется закону нормального распределения $n(r) = n_0 \cdot p(r, r_0, \sigma)$,

где $p(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}\right)$ – плотность вероятности нормального

распределения. Считая, что наиболее вероятное место падения капель находится на расстоянии $r_0 = R_{тп}$ от оси ванны (рис. 3.2), а

среднеквадратическое отклонение зависит от размера области наиболее вероятного падения каплей $\sigma = d_{\text{п}}/6$, где $d_{\text{п}}$ – ширина области наиболее вероятного падения каплей. Учитывая это и то, что распределение частоты падающих каплей по поверхности ванны металла определяется двумя параметрами $R_{\text{п}}$ и $d_{\text{п}}$, можно записать:

$$n(r) = n_0 \cdot \frac{6}{d_{\text{п}} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{18 \cdot (r - R_{\text{п}})^2}{d_{\text{п}}^2}\right), \text{ с}^{-1}. \quad (17)$$

Пример расчетов по этой зависимости для $R_{\text{п}} = 20$ мм при разных $d_{\text{п}}$ показан на рис. 3.3.

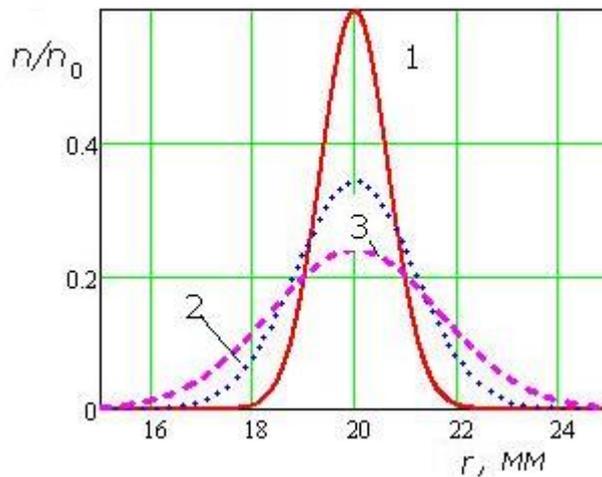


Рис. 3.3. Распределение относительной частоты падающих каплей по поверхности металла ($R_{\text{п}} = 20$ мм) при: 1 – $d_{\text{п}} = 4$ мм; 2 – $d_{\text{п}} = 7$ мм; 3 – $d_{\text{п}} = 10$ мм

В работе [111] показано, что динамика удара капли о поверхность жидкости существенно зависит от начальной скорости капли и толщины слоя жидкости. Установлено, что чем больше начальная скорость капли, тем сильнее всплеск и больше погружение капли в жидкость.

Глубину проникновения в жидкость множества падающих каплей можно оценить на основе известных экспериментальных данных глубины

погружения газовой струи в жидкость. Наиболее удобными являются зависимости, полученные на основе импульса струи, например [112]:

$$L = 3,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{i}{\rho_{\text{мж}} \cdot g}}, \text{ м,}$$

где $i = W_c \cdot G_c$ – импульс струи, Н; W_c , G_c – скорость струи и ее массовый расход соответственно. При падении на поверхность металла множества капель массой $m_{\text{ч}}$ импульс, передаваемый жидкой ванне по ее радиусу, можно

оценить как $i = W_{\text{ч}} \cdot m_{\text{ч}} \cdot n(r) = W_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{мж}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{ч}}^3}{6} n(r)$. Подставляя, получим

глубину проникновения капель по радиусу ванны

$$L(r) = 3,5 \cdot D_{\text{ч}} \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot W_{\text{ч}} \cdot n(r)}{6 \cdot g}}, \text{ м.} \quad (18)$$

На рис. 3.4 показан пример расчета глубины проникновения падающих капель диаметром $D_{\text{ч}} = 4$ мм по поверхности металла при скорости плавления электрода диаметром $D = 40$ мм, равной $V_{\text{п}} = 1$ мм/с, при разной ширине области наиболее вероятного падения капель. При этом частота следования капель металла с электрода составила $n_0 = 38$.

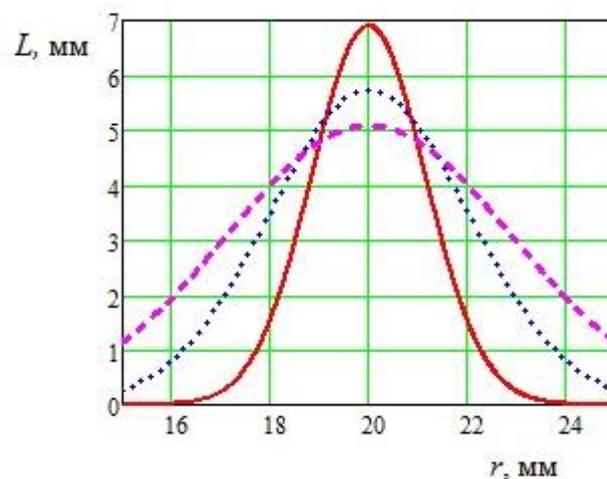


Рис. 3.4. Глубина проникновения падающих капель по поверхности металла

($R_{\text{п}} = 20$ мм, $V_{\text{п}} = 1$ мм/с) при: 1 – $d_{\text{п}} = 4$ мм; 2 – $d_{\text{п}} = 7$ мм; 3 – $d_{\text{п}} = 10$ мм

Если задать другой диаметр капель при той же скорости плавления, то кривые, показанные на рис. 3.4, останутся неизменными.

Зная скорость плавления расходуемого электрода V_n , можно оценить частоту следования капель металла как отношения объема жидкого металла, стекающего с электрода диаметром D в единицу времени, к объему одной капли, имеющей средний диаметр D_q :

$$n_0 = V_n \frac{3 D^2}{2 D_q^3}, \text{ с}^{-1}. \quad (19)$$

Действительно, если в формулу (18) подставить (17) и (19), то получим

$$L(r) = 3,5 \cdot D_q^3 \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot W_q \cdot p(r, R_n, d_n / 6)}{6 \cdot g} \frac{3}{2} V_n \frac{D^2}{D_q^3}}.$$

Окончательное выражение для глубины проникновения капель, не зависящее от диаметра частицы:

$$L(r) = 3,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot W_q \cdot p(r, R_n, d_n / 6)}{4 \cdot g} V_n \cdot D^2}. \quad (20)$$

В данном случае это связано с тем, что при изменении диаметра капель при постоянной скорости их суммарный импульс воздействия на жидкую ванну не меняется.

В качестве упрощения примем, что область падения капель представляет собой полый цилиндр с внутренним и внешним радиусом $R_n - d_n/2$ и $R_n + d_n/2$ соответственно и высотой, равной максимальному значению глубины проникновения металла в ванну: $h_n = L(R_n)$.

Зная глубину проникновения капель в металлическую жидкую ванну, можно оценить объем области падения горячих капель:

$$V_0 = \pi \left[\left(R_n + \frac{d_n}{2} \right)^2 - \left(R_n - \frac{d_n}{2} \right)^2 \right] \cdot L(R_n), \text{ м}^3, \quad (21)$$

где $p(R_n) = \frac{6}{d_n \cdot \sqrt{2\pi}}$; $L(R_n) = 3,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot W_q \cdot \sqrt{\pi/8}}{d_n \cdot g} V_n \cdot D^2}$.

Тепловая мощность, вносимая каплями в жидкую ванну $Q_0 = C_{\text{мж}} \cdot V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{мж}} (T_{\text{ч}} - \bar{T}_0) \cdot \pi \cdot D^2/4$, Вт, где \bar{T}_0 – средняя температура металла в области падения капель, определяемая как

$$\bar{T}_0 = \frac{2\pi}{V_0} \int_0^{h_{\text{п}}} \int_{R_{\text{п}} - \frac{d_{\text{п}}}{2}}^{R_{\text{п}} + \frac{d_{\text{п}}}{2}} T(r, z) \cdot r \cdot dr \cdot dz. \quad (22)$$

Средняя мощность внутренних источников тепла в области падения капель

$$q_v = \frac{Q_0}{V_0} = \frac{C_{\text{мж}} \cdot V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{мж}} (T_{\text{ч}} - \bar{T}_0) \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot V_0}, \text{ Вт/см}^3. \quad (23)$$

Например, при скорости плавления $V_{\text{п}}=1$ мм/с электрода диаметром $D=50$ мм, $(T_{\text{ч}} - \bar{T}_0) = 100$ °С получится $Q_0=804$ Вт, при $R_{\text{п}}=20$ мм и $d_{\text{п}}=4$ мм объем области падения капель $V_0 \approx 3,47$ см³. Отсюда средняя мощность внутренних источников тепла в области падения капель составляет $q_v \approx 232$ Вт/см³.

Вследствие нелинейности уравнения (1) и сложных граничных условий точное аналитическое решение краевой задачи (2)–(16) невозможно. Для получения приближенного решения с помощью ЭВМ использовался метод конечных разностей.

Введем разностную сетку, регулярную по пространственным переменным и времени с координатами узлов (рис. 3.5): $r_i = (i-1) \cdot \Delta r$, $z_j = (j-1) \cdot \Delta z$, $\tau_k = k \cdot \Delta \tau$. Сетка имеет постоянные шаги по координате r – $\Delta r = \frac{R_{\text{с}}}{N_R - 1}$ и по координате z – $\Delta z = \frac{h_{\text{м}}}{N_z - 1}$ и времени $\Delta \tau$, где $i=1, 2, \dots, N_R$, $j=1, 2, \dots, N_z$, $k=0, 1, 2, \dots, K$; N_R , N_z и K – число интервалов на рассматриваемой области по осям r , z и τ соответственно; K – конечный шаг по времени, при котором достигается установившийся квазистационарный режим. Сеточные функции будем обозначать при помощи индексов $T(r_i, z_j, \tau_k) = T_{i,j}^k$.

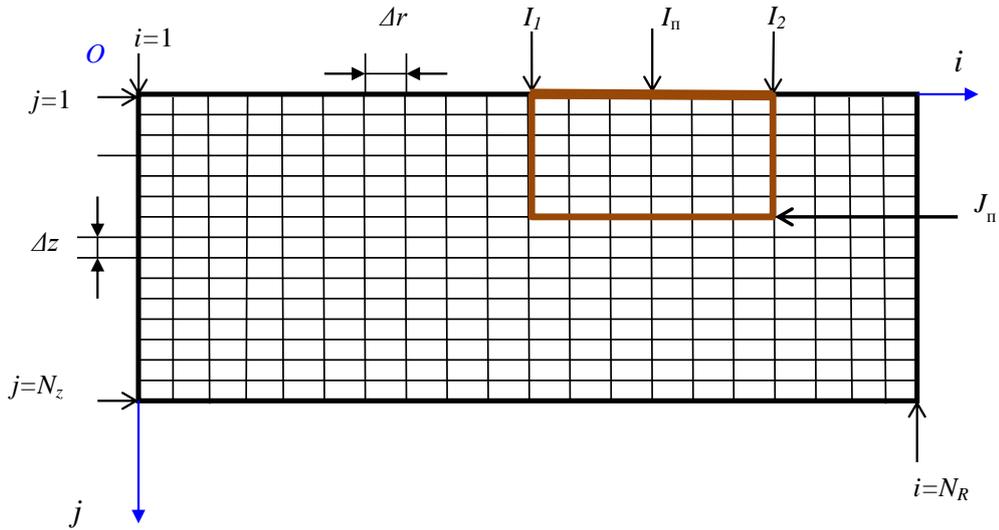


Рис. 3.5. Схема наложения разностной сетки на рабочую область

Введем следующие обозначения:

– сеточные координаты области падения капель по радиусу ванны:

$$I_n = \text{round}\left(\frac{R_n}{\Delta r} + 1\right),$$

$$I_1 = \text{round}\left(\frac{R_n - d_n/2}{\Delta r} + 1\right) = I_n - \text{round}\left(\frac{d_n}{2\Delta r}\right),$$

$$I_2 = \text{round}\left(\frac{R_n + d_n/2}{\Delta r} + 1\right) = I_n + \text{round}\left(\frac{d_n}{2\Delta r}\right);$$

– сеточная глубина проникновения капель в жидкую ванну

$$J_n = \text{round}\left(\frac{h_n}{\Delta z} + 1\right).$$

Для расчета поля температур используем схему расщепления по координатам. На каждом шаге по времени введем промежуточный этап, на котором будем записывать одномерную аппроксимацию по одному из пространственных направлений. Рассматриваемая двумерная задача «расщепляется» на последовательность одномерных задач по каждой из координат. Погрешности аппроксимаций промежуточных слоев при суммировании уничтожаются.

Для решения уравнения (2) используем схему расщепления, которая приводит к безусловно устойчивой локально-одномерной схеме,

по оси r

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_0 \quad (24)$$

и по оси z

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_0, \quad (25)$$

где $a = \frac{\lambda_m}{c_{\text{эф}} \rho_m}$, $q_0 = \frac{q_v}{c_{\text{эф}} \cdot \rho_m}$.

Используя симметричную аппроксимацию пространственных производных

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta r^2}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 2T_{i,j}}{\Delta z^2}, \quad \frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta r},$$

при $\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau}$, получаем:

$$\frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau / 2} = a \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta r^2} + \frac{1}{(i-1) \cdot \Delta r} \cdot \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - T_{i-1,j}^{k+1/2}}{2 \cdot \Delta r} \right) + q_{0i,j},$$

$$\frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta \tau / 2} = a \left(\frac{T_{i,j+1}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1}}{\Delta z^2} \right) + q_{0i,j}.$$

Сделав некоторые упрощения и преобразования, имеем:

$$F_{0r} \left(1 + \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i+1,j}^{k+1/2} - (2F_{0r} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + \\ + F_{0r} \left(1 - \frac{1}{2(i-1)} \right) \cdot T_{i-1,j}^{k+1/2} = -T_{i,j}^k - q_{0i,j} \cdot \frac{\Delta \tau}{2}, \quad (26)$$

$$F_{0z} \cdot T_{i,j+1}^{k+1} - (2F_{0z} + 1) \cdot T_{i,j}^{k+1} + F_{0z} \cdot T_{i,j-1}^{k+1} = -T_{i,j}^{k+1/2} - q_{0i,j} \cdot \frac{\Delta \tau}{2}, \quad (27)$$

где $F_{0r} = \frac{a \cdot \Delta \tau}{2 \cdot \Delta r^2}$, $F_{0z} = \frac{a \cdot \Delta \tau}{2 \cdot \Delta z^2}$.

При решении уравнения (25) для цилиндрической стенки получим уравнение в виде трехдиагональной матрицы:

$$T_{i-1,j}^{k+1/2} \cdot A_i - T_{i,j}^{k+1/2} \cdot B_i + T_{i+1,j}^{k+1/2} \cdot C_i = D_i, \quad (28)$$

где $A_i = F_{0r} \left(1 - \frac{1}{2(i-1)} \right)$, $B_i = 1 + 2F_{0r}$, $C_i = F_{0r} \left(1 + \frac{1}{2(i-1)} \right)$, $D_i = -T_{i,j}^k - q_{0i,j} \cdot \frac{\Delta\tau}{2}$.

Аналогично, при решении уравнения (26) для плоской стенки имеем систему уравнений:

$$T_{i,j-1}^{k+1} A_j - T_{i,j}^{k+1} B_j + T_{i,j+1}^{k+1} C_j = D_j, \quad (29)$$

где $A_j = F_{0z}$, $B_j = 1 + 2F_{0z}$, $C_j = F_{0z}$, $D_j = -T_{ij}^{k+1/2} - q_{0i,j} \cdot \frac{\Delta\tau}{2}$.

Решая последовательно задачи (28) и (29), получаем значение функции $T_{i,j}^{k+1}$, которое отличается от истинного значения $T(r, z, \tau)$ решения уравнения (2) лишь на величину $O(\Delta\tau^2)$. При этом процесс решения двухмерной задачи заменяется процессом последовательного решения двух одномерных задач. Описанная разностная схема расщепления (28)–(29) имеет преимущества в смысле простоты и наглядности решаемой задачи и относительно небольшого объема вычислений.

Каждое из соотношений (28) и (29) образует систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые решались методом прогонки [113, 114].

Алгоритм прогонки

1. Для всех $i = 2, 3, \dots, N-1$ определяем коэффициенты (прямая прогонка)

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}; \quad \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - D_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \quad (30)$$

при этом считаем известными α_1 и β_1 из левого граничного условия.

2. При всех $i = (N-1), \dots, 2, 1$ определяем температуры (обратная прогонка)

$$T_i = \alpha_i \cdot T_{i+1} + \beta_i, \quad (31)$$

при этом считаем известным T_N из правого граничного условия.

Для оценки установления квазистационарного температурного поля использовалась максимальная скорость изменения температуры

$$\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{max} \approx \frac{\max|T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k|}{\Delta\tau}. \quad (32)$$

Расчет прекращается, когда поле температур становится установившимся при

$$\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{max} \leq \zeta. \quad (33)$$

В качестве критерия установления квазистационарного температурного поля можно принять $\zeta = 1$ град/мин.

Алгоритм дискретизации начальных условий

Начальные условия

Зная ориентировочную глубину жидкой ванны h_b , определим ее сеточное значение $J_b = \text{round}\left(\frac{h_b}{\Delta z} + 1\right)$, имеем начальное распределение температур:

$$\text{(для } i=1 \dots N_R, j=1, 2, \dots, J_b) \quad T_{i,j} = T_L + \Delta T_0, \quad (34)$$

$$\text{(для } i=1 \dots N_R, j=J_b + 1, 2, \dots, J_z) \quad T_{i,j} = T_s - \Delta T_0. \quad (35)$$

Граничные условия

Для реализации алгоритма прогонки (30)–(31) проведем дискретизацию граничных условий (11)–(16) с погрешностью $O(h)$. При прогонке по r на левой границе $i = 1$ имеем граничное условие на оси симметрии ванны, из выражения (31) можно записать $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$, из условия (10) $T_1 = T_2$, решая совместно эти уравнения, получим

$$\text{(при } i = 1, j = 2 \dots N_z - 1) \quad \alpha_1 = 1, \quad \beta_1 = 0 \quad (36)$$

На правой границе $i = N_R$ (граничное условие на внутренней стенке кристаллизатора) из выражений (11), (14) имеем

$$-\lambda_{мж} \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = k_{тст} (T(R_\theta, z, \tau) - t_\theta).$$

Приведем граничное условие в разностном виде

$$\lambda_{\text{мж}} \frac{(T_{N_R-1} - T_{N_R})}{\Delta r} = k_{\text{тст}} (T_{N_R} - t_{\epsilon}).$$

Подставим в него выражение на основе (31) $T_{N_R-1} = \alpha_{N_R-1} T_{N_R} + \beta_{N_R-1}$, получим

$$\text{(при } i=N_R, j=2 \dots N_Z-1) \quad T_{N_R} = \frac{t_{\epsilon} \cdot \Delta r \cdot k_{\text{тст}} + \lambda_{\text{мж}} \cdot \beta_{N_R-1}}{\Delta r \cdot k_{\text{тст}} + \lambda_{\text{мж}} (1 - \alpha_{N_R-1})}. \quad (37)$$

При прогонке по z на левой границе $j=1$ запишем граничное условие третьего рода, из выражения (31) имеем $T_1 = \alpha_1 T_2 + \beta_1$, из выражения (15) $-\lambda_{\text{мж}} \frac{T_2 - T_1}{\Delta z} = \alpha_f (T_f - T_1)$, решая совместно эти уравнения, получаем

$$\text{(при } i=1 \dots N_R-1, j=1) \quad \alpha_1 = \frac{\lambda_{\text{мж}}}{\lambda_{\text{мж}} + \Delta z \cdot \alpha_f}, \quad \beta_1 = \frac{\Delta z \cdot \alpha_f}{\lambda_{\text{мж}} + \Delta z \cdot \alpha_f} T_f. \quad (38)$$

На правой границе $j = N_z$ (граничное условие на поверхности поддона) из выражения (16) получим граничное условие в разностном виде

$$\lambda_{\text{мт}} \frac{(T_{N_z-1} - T_{N_z})}{\Delta z} = k_{\text{тп}} (T_{N_z} - t_{\epsilon})$$

Подставим в него (30) $T_{N_z-1} = \alpha_{N_z-1} T_{N_z} + \beta_{N_z-1}$, имеем:

$$\text{(при } i=1 \dots N_R-1, j=N_z) \quad T_{N_z} = \frac{t_{\epsilon} \cdot \Delta z \cdot k_{\text{тп}} + \lambda_{\text{мт}} \cdot \beta_{N_z-1}}{\Delta z \cdot k_{\text{тп}} + \lambda_{\text{мт}} (1 - \alpha_{N_z-1})}. \quad (39)$$

Среднюю температуру металла в области падения капель (2.21) определим по формуле интегрирования методом трапеций

$$\bar{T}_0 = \frac{2\pi}{V_0} \int_0^L \int_{R_n - \frac{d_n}{2}}^{R_n + \frac{d_n}{2}} T(r, z) r \cdot dr \cdot dz \approx \frac{2\pi}{V_0} \Delta z \cdot \left[\frac{Tr_1 + Tr_{j_n}}{2} + \sum_{j=2}^{j_n-1} Tr_j \right], \quad (40)$$

где $V_0' = \pi \cdot \Delta r^2 \cdot \Delta z (I_2^2 - I_1^2) \cdot J_n$ – объем дискретной области падения горячих капель, полученный на основе (20);

$$Tr_j = \Delta r^2 \cdot \left[\frac{T_{I_1,j} \cdot (I_1 - 1) + T_{I_2,j} \cdot (I_2 - 1)}{2} + \sum_{i=I_1+1}^{I_2-1} (T_{i,j} \cdot (i - 1)) \right] - \text{приближенное значение}$$

интеграла $\int_{R_n - \frac{d_n}{2}}^{R_n + \frac{d_n}{2}} T(r, z) r \cdot dr$.

Таким образом, разработан численный алгоритм (30)–(39), позволяющий приближенно решать дифференциальное уравнение (2) с краевыми условиями (8)–(16).

3.3. Программное моделирование теплового поля в жидкой металлической ванне при электрошлаковом переплаве

На основе предложенной математической модели и алгоритма решения краевой задачи создана компьютерная программа «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки в установке ЭШП» с использованием среды разработки Matlab version 7.11 (R2010b) [115].

Для расчета необходимо произвести ввод данных с использованием файла *isch_data.m*. Все исходные данные разделены на 5 групп.

Группа 1. Химические свойства стали.

Для расчёта взят состав, соответствующий стали 30X13.

Группа 2. Геометрические параметры установки ЭШП.

Rp=20; % Наиболее вероятное место падения капель металла, мм
 dp=5; % Ширина области наиболее вероятного падения капель, мм
 Dv=60; % Диаметр получаемого слитка, мм
 D=50; % Диаметр переплавного электрода, мм
 hm=120; % Высота формируемого слитка, мм
 hv=60; % Предполагаемая высота жидкой части ванны (часть hm), мм

Группа 3. Основные технологические параметры.

| | |
|--------------------------|---|
| Delta_t0=40; | % Перегрев расплава над т. ликвидус или охлаждение над т. солидус, °С |
| tv=30; | % Температура охлаждающей воды, °С |
| Vp=1.0; | % Скорость плавления электрода, мм/с |
| Wch=100; | % Скорость частиц при попадании в жидкую металлическую ванну, мм/с |
| Tch=1550; | % Температура капель при их попадании в жидкую ванну, °С |
| K_tst=0.295E3/ 0.9E3; | % Коэффициент теплопередачи через стенку кристаллизатора, Вт/(м ² · К) |
| ALFAf=2000; | % Коэффициент теплоотдачи от шлака к металлу, Вт/(м кв К) |
| Tf=1600; | % Температура флюса, °С |
| K_tp=0.16E3; | % Коэффициент теплопередачи через стенку поддона, Вт/(м кв К) |
| g=9.81; | % Ускорение свободного падения, м/с кв |

Группа 4. Теплофизические свойства стальной затвердевающей заготовки.

Свойства металла, используемого при моделировании, приведены в табл. 3.1.

Группа 5. Параметры численного алгоритма.

В последней группе вводится добавочная информация о параметрах численного расчета и управляющая информация о выводимых результирующих данных, в частности, о выводе графиков: зависимости теплофизических свойств стали от температуры и средней температуры области горячих капель от времени.

Nr=41; % Число точек по оси r;

$N_z=41$; % Число точек по оси z ;
 $Dzeta=1$; % Достигнутая скорость изменения температуры, град/мин
 $TAUK=0$; % Конечное время, с; если задать $TAUK=0$, то выбирается
 время до наступления квазистационарного состояния
 $dTau=0.05$; % Заданный шаг по времени, с, если принять $dTau=0$, то
 выбор автоматический;
 $iter_max=5000$; % Максимальное число итераций
 $dTau_output=10$; % Шаг по времени, с, для вывода промежуточных
 результатов;
 $Flag_output=0$; % если 1 – выводить табличные промежуточные
 результаты; другое – не выводить;
 $Flag_svoystva=0$; % если 1 – выводить графики т/ф свойств от температуры;
 другое – не выводить;
 $Flag_Tk=0$; % если 1 – выводить распределение температуры по высоте
 ванны в области горячих капель; другое – не выводить.

При задании исходных данных R_p не должно быть меньше $dp/2$. В комментариях указаны единицы измерения вводимых величин.

Запуск программы на выполнение осуществляется с помощью файла *Raschet_teplovoe_sostoyanie.m*. В рабочем окне *CommandWindow* выдается информация о некоторых исходных и предварительно рассчитанных данных.

Значения, применяемые для расчёта:

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ:

| | |
|---|----------------|
| Нач. темпер расплава стали в жидкой ванне, °С, | $tm0_g= 1537$ |
| Нач. темпер затвердевшего слитка в кристаллизаторе, °С, | $tm0_t= 1423$ |
| Температура ликвидуса, °С, | $t_lik= 1497$ |
| Температура солидуса, °С, | $t_sol= 1463$ |
| Наиболее вероятное место падения капель металла, мм, | $Rp=20.0$ |
| Ширина области наиболее вероятного падения капель, мм, | $dp=5.0$ |
| Диаметр получаемого слитка, мм, | $Dv=60.0$ |

| | |
|--|----------|
| Диаметр электрода, мм, | DD=50.0 |
| Высота формируемого слитка, мм, | hm=120.0 |
| Предполагаемая высота жидкой части ванны, мм, | hv=60.0 |
| Скорость плавления электрода, мм/с, | Vp=2.0 |
| Скорость частиц при ударе о жидкий металл, мм/с, | Wch=100 |
| Температура капель в жидкую ванну, °С, | Tch=1550 |
| Максимальная глубина проникновения капель в ванну, мм, | hp=94 |

2. ПАРАМЕТРЫ СЕТКИ И РАСЧЕТА

| | |
|---|-----------------------------|
| Шаг между узлами сетки по координате r, мм, | dr=0.60 |
| Шаг между узлами сетки по координате z, мм | dz=3.00 |
| Число разбиений по координате r, | Nr-1=50 |
| Число разбиений по координате z, | Nz-1=40 |
| Дополнительные сеточные параметры: | Ip, I1, I2, Jp= 34 30 38 32 |
| Конечное время выбирается до квазистационарного состояния | |
| Автомат.выбор расчетного шага по времени, (с) | dTau=0.04212 |
| Расчет до наступления квазистационарного состояния | |
| Объем области падения горячих капель, см куб, | V0=59.1 V00=58.8 |

3. РАСЧЕТНОЕ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР

| | |
|---|---------------------------|
| Средняя температура металла в области падения капель, °С, | T0= 1367 |
| Средняя мощность внутренних источников тепла в области падения капель, Вт/см куб | qv= 49.79 |
| Макс скорость изменения температуры, °С/с, | Tmax_dTau=0.017 |
| Число итераций, | iter= 8564 TAU= 360.716 с |
| Средняя темп.кристаллизующейся заготовки | Tsr= 1292 |

Далее выдается поле температур формируемого слитка в табличном виде и его визуализация в виде диаграмм с линиями уровня.

Программа даёт возможность построения изотерм сечения металлической ванны при ЭШП в зависимости от места доставки капель электродного металла. С позиции получения слоистой композиции в формируемом слитке необходимо выделить условия получения минимальной переходной зоны между слоями металла, то есть определить условия, при которых будет образовываться минимальная глубина металлической ванны.

В качестве модельных данных выбрана сталь марки 30X13, установка для электрошлакового переплава А-550, $I=1.5$ кА, $U=45$ В.

Моделирование изотерм формируемой заготовки велось в зависимости от места доставки капель электродного металла и от коэффициента заполнения кристаллизатора. Так же моделирование проводилось по различным значениям коэффициента теплопроводности между формируемой заготовкой и кристаллизатором. По Ключеву М.М. [110] данный коэффициент равен $k_{\text{тст}} = 0,295$ Вт/(м² · К), более новые данные по Барселлосу [116] показывают значение от $k_{\text{тст}} = 0,9$ Вт/(м² · К) в зависимости от размера кристаллизатора. Разница значений в три раза подводит к необходимости сравнить результаты моделирования.

Для моделирования взяты следующие исходные параметры:

- химический состав, соответствующий стали 30X13 (С – 0,30 %, Mn – 0,3 %, Si – 0,25 %, S – 0,02 %, P – 0,02 %, Cr – 12 %);
- диаметр получаемой заготовки (диаметр кристаллизатора) 90 мм, 150 мм;
- коэффициенты заполнения кристаллизатора – 0,44, 0,66 и 1,77;
- коэффициент теплопроводности между формируемой заготовкой и кристаллизатором 0,295 и 0,900 Вт/(м² · К);
- место доставки капель электродного металла R_K (выбиралось в зависимости от диаметра кристаллизатора).

Исходные данные для моделирования сведены в табл. 3.2 и 3.3.

Визуализация результатов моделирования представлена на рис. 3.6. На изображениях представлены изотермы по ½ сечения формируемого слитка.

Две верхние изотермы соответствуют линиям ликвидус и солидус стали 30Х13. Линия солидус отвечает линии фронта кристаллизации и описывает форму металлической ванны.

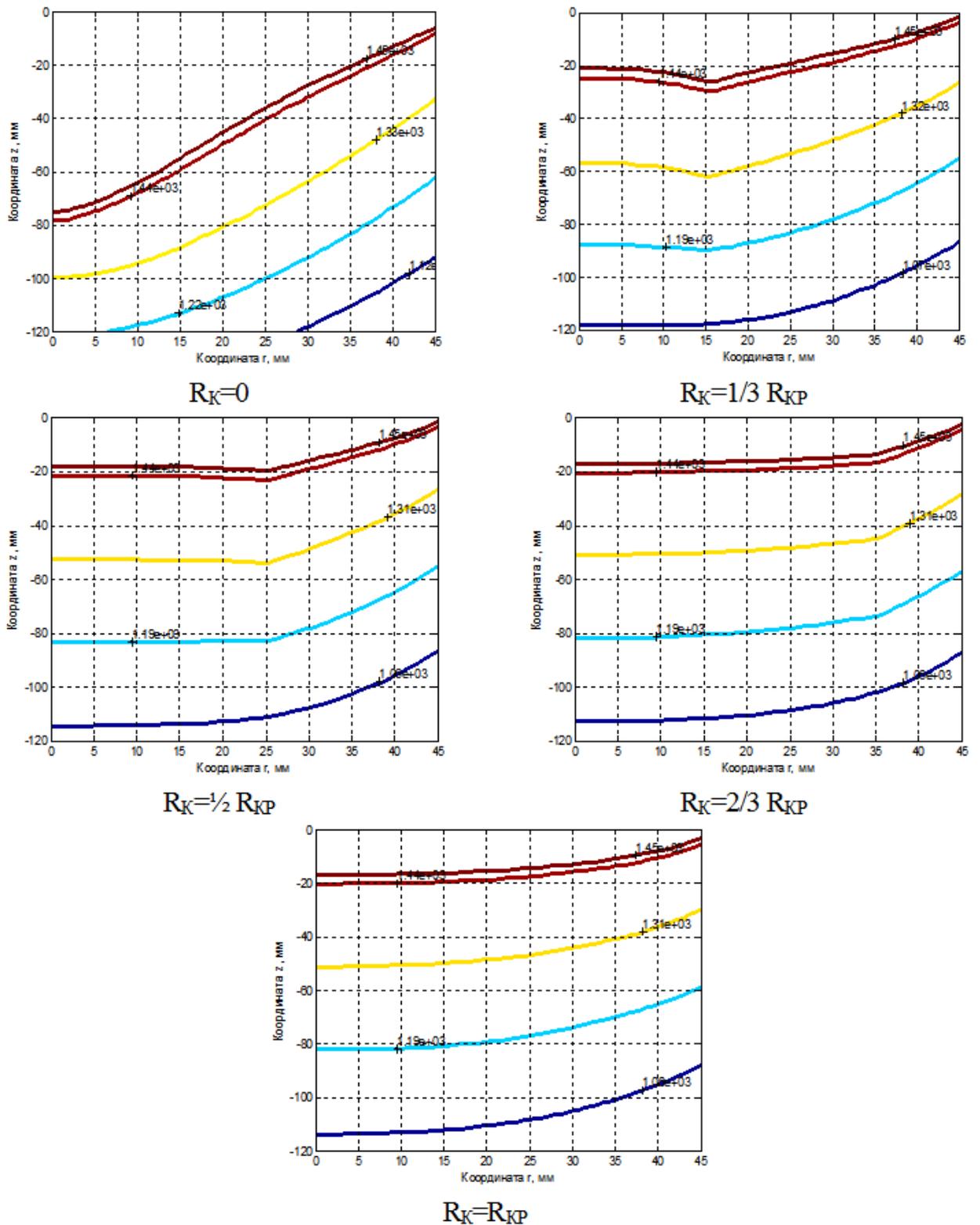


Рис. 3.6. Изотермы температурного состояния слитка при $D_{KP} / D_{ЭЛ} = 90 / 40$ мм, в зависимости от места доставки капле электродного металла R_K

Таблица 3.2

Исходные параметры для экспериментального моделирования

| D _{КР} , мм | D _{ЭЛ} | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| | K _{зап} =0,44 | K _{зап} =0,66 | K _{зап} =0,77 |
| 90 | 40 | 60 | 70 |
| 150 | 90 | 110 | 130 |
| Химический состав электрода С – 0,30 %, Mn – 0,3 %, Si – 0,25 %, S – 0,02 %, P – 0,02 %, Cr – 12 % | | | |

Таблица 3.3

Место доставки капель электродного металла

| D _{КР} , мм | Место доставки капель электродного металла R _К , мм | | | | |
|----------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| | 0 | 1/3 R _{КР} | 1/2 R _{КР} | 2/3 R _{КР} | R _{КР} |
| 90 | 0 | 15 | 25 | 30 | 44 |
| 150 | 0 | 25 | 37,5 | 50 | 74 |

Используя разработанную программу, проведено моделирование изотерм формируемого слитка, получаемого электрошлаковым переплавом, в зависимости от места доставки капель электродного металла и от коэффициента заполнения кристаллизатора. Для кристаллизатора диаметром 90 мм данные представлены в табл. 3.4 и 3.5. В табл. 3.4 сведены данные о глубине металлической ванны в зависимости от места доставки электродного металла R_К и коэффициента заполнения кристаллизатора с учётом коэффициента теплопередачи по Ключеву. В табл. 3.5 аналогичные данные, коэффициент теплопередачи взят по Барселлосу. Для кристаллизатора диаметром 150 мм данные представлены в табл. 3.6 и 3.7

Таблица 3.4

Глубина металлической ванны для кристаллизатора 90 мм в зависимости от места доставки капель электродного металла R_К, коэффициента заполнения кристаллизатора, коэффициента теплопередачи по Ключеву

| D _{ЭЛ} | Глубина металлической ванны, мм | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| | 0 | 1/3 R _{КР} | 1/2 R _{КР} | 2/3 R _{КР} | R _{КР} |
| 40 мм, K _{зап} =0,44 | 78 | 28 | 26 | 22 | 22 |
| 60 мм, K _{зап} =0,66 | 98 | 44 | 32 | 25 | 22 |
| 70 мм, K _{зап} =0,77 | 110 | 50 | 38 | 24 | 22 |

Таблица 3.5

Глубина металлической ванны для кристаллизатора 90 мм в зависимости от места доставки капель электродного металла $R_{кр}$, коэффициента заполнения кристаллизатора, коэффициента теплопередачи по Барселлосу.

| $D_{эл}$ | Глубина металлической ванны, мм | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | 0 | $1/3 R_{кр}$ | $1/2 R_{кр}$ | $2/3 R_{кр}$ | $R_{кр}$ |
| 40 мм, $K_{зап}=0,44$ | 77 | 25 | 16 | 16 | 15 |
| 60 мм, $K_{зап}=0,66$ | 98 | 38 | 26 | 22 | 21 |
| 70 мм, $K_{зап}=0,77$ | 108 | 45 | 31 | 22 | 21 |

Таблица 3.6

Глубина металлической ванны для кристаллизатора 150 мм в зависимости от места доставки капель электродного металла $R_{кр}$, коэффициента заполнения кристаллизатора, коэффициента теплопередачи по Клюеву

| $D_{эл}$ | Глубина металлической ванны, мм | | | | |
|------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | 0 | $1/3 R_{кр}$ | $1/2 R_{кр}$ | $2/3 R_{кр}$ | $R_{кр}$ |
| 90 мм, $K_{зап}=0,44$ | 125 | 65 | 52 | 40 | 36 |
| 110 мм, $K_{зап}=0,66$ | 145 | 78 | 64 | 54 | 34 |
| 130 мм, $K_{зап}=0,77$ | 160 | 90 | 70 | 65 | 40 |

Таблица 3.7

Глубина металлической ванны для кристаллизатора 150 мм в зависимости от места доставки капель электродного металла $R_{кр}$, коэффициента заполнения кристаллизатора, коэффициента теплопередачи по Барселлосу

| $D_{эл}$ | Глубина металлической ванны, мм | | | | |
|------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | 0 | $1/3 R_{кр}$ | $1/2 R_{кр}$ | $2/3 R_{кр}$ | $R_{кр}$ |
| 90 мм, $K_{зап}=0,44$ | 127 | 57 | 45 | 34 | 32 |
| 110 мм, $K_{зап}=0,66$ | 141 | 71 | 56 | 42 | 31 |
| 130 мм, $K_{зап}=0,77$ | 158 | 88 | 69 | 51 | 32 |

Сравнение данных моделирования в зависимости от коэффициента теплопроводности между формируемой заготовкой и кристаллизатором показывает некоторое различие в данных, однако не изменяет общей тенденции в изменении глубины металлической ванны в зависимости от изменения места доставки капель электродного металла.

По данным табл. 3.5 и 3.7 построены графические зависимости глубины металлической ванны от места доставки электродного металла для кристаллизаторов диаметром 90 и 150 мм (рис. 3.7, 3.8). Из диаграммы следует, что перенос места доставки капель из подэлектродной зоны в место, соответствующее $1/3$ радиуса кристаллизатора, уменьшает глубину металлической ванны более чем в два раза. Для кристаллизатора диаметром 90 мм, при коэффициенте заполнения $K_{\text{зап}}=0,44$ – глубина металлической ванны с 77 мм уменьшается до 25 мм, т.е. на 68,18 %. При $K_{\text{зап}}=0,66$, глубина с 98 мм уменьшилась до 38 мм, т.е. на 61,22 %. При $K_{\text{зап}}=0,77$, глубина с 108 мм уменьшилась до 45 мм, т.е. на 58,33 %.

Для кристаллизатора 150 мм смещение места доставки капель электродного металла ближе к стенке кристаллизатора так же приводит к уменьшению глубины жидкой металлической ванны. Изменяя место доставки капли с подэлектродной зоны ($R_K = 0$ мм) на расстояние, равное $1/3 R_{\text{КР}}$, глубина металлической ванны уменьшается на 44...55 % (рис. 3.8). При диаметре кристаллизатора 150 мм и коэффициенте заполнения $K_{\text{зап}}=0,44$ – глубина металлической ванны с 127 мм уменьшается до 57 мм, т.е. на 55,11 %. При $K_{\text{зап}}=0,66$, глубина с 141 мм уменьшилась до 71 мм, т.е. на 49,64 %. При $K_{\text{зап}}=0,77$, глубина с 158 мм уменьшилась до 88 мм, т.е. на 44,30 %.

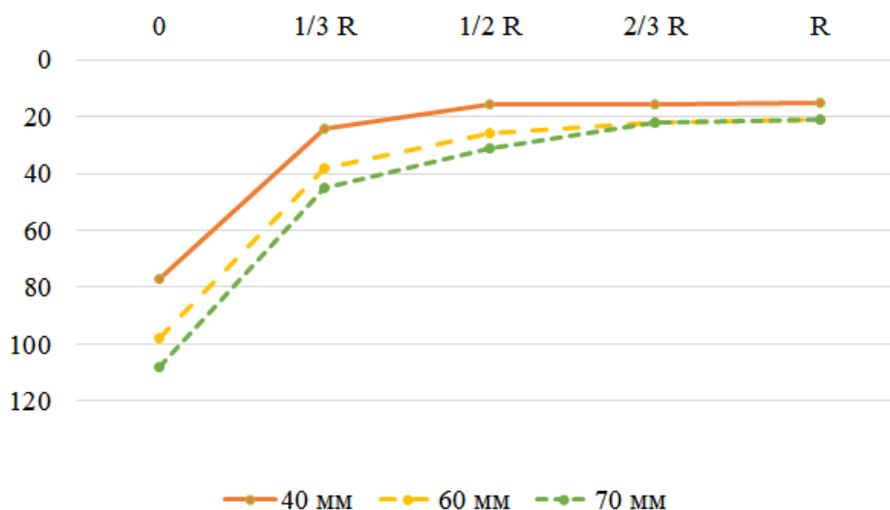


Рис. 3.7. Диаграмма зависимости глубины металлической ванны для диаметра кристаллизатора 90 мм от места доставки электродного металла R_K

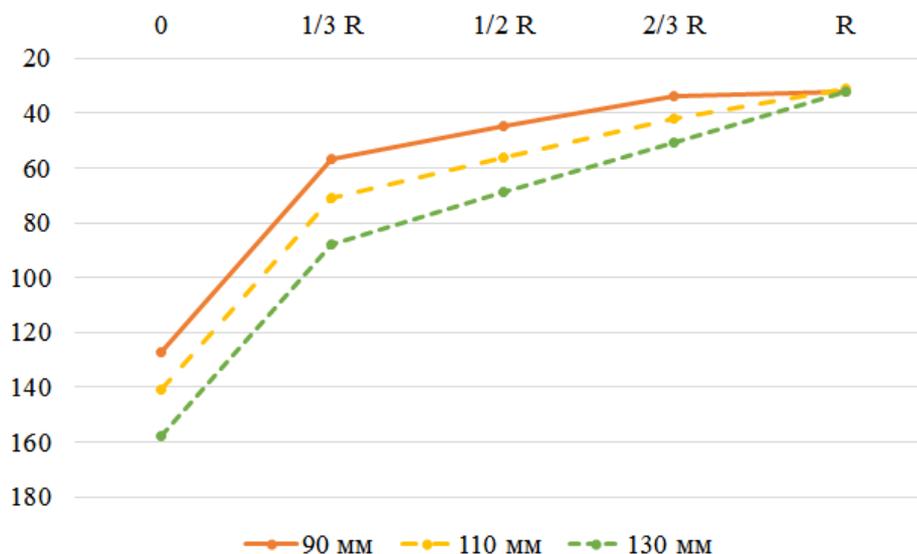


Рис. 3.13. Диаграмма зависимости глубины металлической ванны для диаметра кристаллизатора 150 мм от места доставки электродного металла R_K

Выводы к главе 3

1. Предложена математическая модель квазистационарного теплового состояния жидкометаллической ванны установки ЭШП. Модель учитывает: тепло, поступающее в металлическую ванну с перегретыми каплями металла электрода; тепло, передающееся через поверхность ванны вследствие теплообмена со шлаком; распределение частоты падающих капель по поверхности ванны металла.

2. Дан алгоритм оценки глубины проникновения в жидкий металл множества падающих капель по радиусу ванны, алгоритм определения количества тепла, вносимого каплями металла в ванну, и мощность внутренних источников тепла в области падения капель.

3. На основе созданной математической модели и предложенного численного алгоритма решения краевой задачи создана компьютерная программа «Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки в установке ЭШП». Программа позволяет вводить геометрические и технологические параметры ЭШП и выдавать результирующие квазистационарные

температурные поля в виде таблицы, линий уровня и трехмерной поверхности с окраской.

4. По данным математического моделирования произведена оценка влияния изменения места доставки капель электродного металла, диаметра электрода и коэффициента заполнения кристаллизатора на глубину жидкой металлической ванны.

Глава 4. ПОЛУЧЕНИЕ СЛИТКОВ С МИНИМАЛЬНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНОЙ МЕЖДУ СЛОЯМИ

4.1. Выбор технологического приёма введения присадок, корректирующих химический состав металлической ванны при электрошлаковом переплаве

Введение материалов, изменяющих химический состав жидкой металлической ванны при электрошлаковом переплаве, возможно и технологически осуществимо. Известны технологии, которые заключаются в прямой подаче материалов на шлак между расходуемым электродом и стенкой кристаллизатора или через полый электрод в шлаковую ванну [117, 115]. Принципиальная схема процессов показана на рис. 4.1. Подача материалов, способных в процессе переплава изменять химический состав в жидкой металлической ванне или менять свойства за счёт введения дисперсных твёрдых частиц через шлак, решает задачу получения многослойного слитка или заготовки (рис. 4.1, а). Однако не представляется возможным исключить их взаимодействие с рабочим флюсом. В случае применения металлических порошков, чьё поведение при переплаве подобно материалу переплавляемого электрода, можно предполагать несущественное их воздействие на свойства рабочего флюса.

Для корректировки химического состава металлической ванны возможна прямая подача на шлак металлических порошков, т.к. они имеют больший удельный вес, нежели рабочий флюс. В этом случае вводимые добавки проходят через шлак и достигают поверхности металлической ванны, минимально взаимодействуя с рабочим флюсом. Например, обеспечить изменение химического состава по углероду целесообразно проведением не дачей углерода, а чугуновой крупкой. Удельный вес чугуна $6,6-7,8 \text{ г/см}^3$, что значительно больше удельного веса шлака $2,3-4,0 \text{ г/см}^3$. Для снижения протяжённости переходной зоны следует проводить дифференцированную

дачу углеродсодержащего материала по частоте и концентрации. Первая порция должна нести количество углерода, способное максимально приблизить химический состав объёма металлической ванны к задаваемому, последующие – чтобы поддерживать эту концентрацию по мере поступления электродного металла.

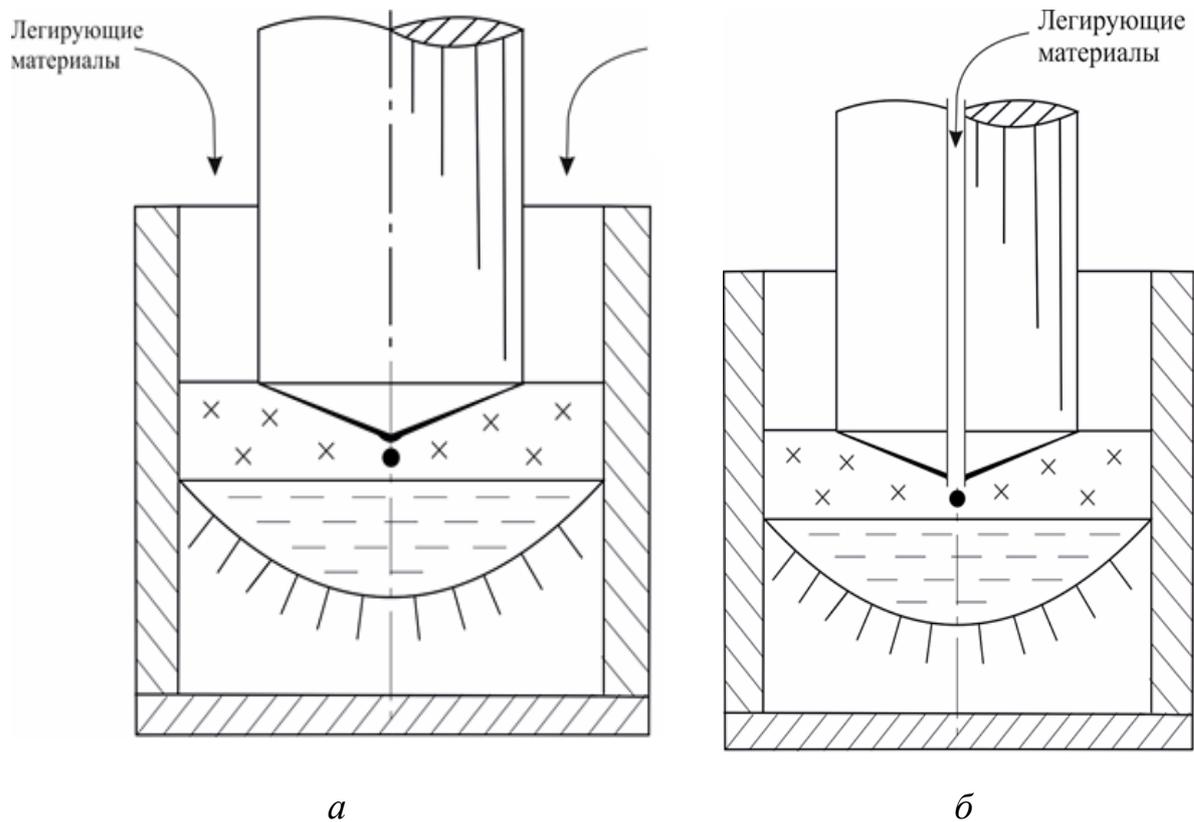


Рис. 4.1. Способы введения легирующих материалов при электрошлаковом переплаве: (а) введение легирующих элементов засыпкой в кристаллизатор; (б) введение легирующих элементов через сквозное отверстие в электроде

Если применять дисперсные частицы, модификаторы, осуществлять микролегирование, то применяемые для этих целей элементы и соединения показывают высокую активность и взаимодействие со шлаком при температурах переплава. Это ведёт не только к низкому усвоению материала, но и, что существенно, к изменению свойств рабочего флюса в процессе электрошлаковой плавки, а именно к изменению его технологических и металлургических функций. Чтобы избежать возникающих в этом случае

трудностей, наиболее технологичным решением будет обеспечение введения материалов непосредственно в жидкую металлическую ванну и снижение влияния корректирующих добавок на изменение свойств рабочего флюса.

Для проведения экспериментальных переплавов с целью подтверждения влияния вращения расходуемого электрода на геометрию фронта кристаллизации был выбран способ введения корректирующей присадки в плавильное пространство печи между кристаллизатором и электродом. Переплавы с введением высокоуглеродистых присадок проводились с вращением расходуемого электрода и без. Введение корректирующих частиц проводилось как однократно, для формирования одного высокоуглеродистого слоя, так и периодически, для формирования нескольких высокоуглеродистых слоёв.

4.2. Апробация способа введения добавок, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, через объём рабочего флюса

Для проведения переплавов применялась полупромышленная установка А-550. Данная электрошлаковая печь позволяет переплавить электроды длиной до двух метров и диаметром до 100 мм, на переменном токе силой 3200 А. Подача электрода осуществляется со скоростью 0,8...10 м/ч. В приводе электрода использовался электродвигатель постоянного тока ПИ-25. Диапазоны корректировки: продольное перемещение ± 100 мм, поперечное – ± 25 мм. Установка А-550 оснащена механизмом вращения расходуемого электрода с возможностью изменять его скорость вращения от 0 до 300 об/мин в процессе переплава [119].

Для определения воздействия вращения расходуемого электрода переплавы проводились двумя способами – без вращения и с вращением расходуемого электрода. Величина достаточной скорости вращения зависит от диаметров электрода и кристаллизатора. Опираясь на зависимость для выбора

скорости вращения от диаметра расходуемого электрода [120] и данные математического моделирования, выбрана скорость вращения электродов 100 об/мин.

На установке А-550 переплавляли катанный расходуемый электрод из стали 30Х13. Химический состав электродов приведён в табл. 4.1. Для формирования многослойной структуры по ходу переплава вводили углеродсодержащую присадку. В качестве углеродсодержащего материала использовали чугунную стружку состава, соответствующего марке СЧ15. Размер частиц присадки 3-5 мм. Технологические характеристики переплавов сведены в табл. 4.2.

Для формирования одного высокоуглеродистого слоя и фиксации положения металлической ванны (переплав 11 и 12) присадка вводилась порционно: первая присадка в количестве 250 г, последующие три присадки – 80 ± 2 г. С целью получения многослойного материала с различными по содержанию углерода слоями проведён опытный переплав № 13. Переплав происходил аналогично переплавам 11 и 12, с той разницей, что подача науглераживающего компонента осуществлялась в количестве 7 раз и масса присадки составила 100 г.

Таблица 4.1

Химический состав электродов, %масс.

| № плавки | C | Si | Mn | S | P | Cr |
|----------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 11 | 0,28 | 0,64 | 0,55 | 0,004 | 0,026 | 13,15 |
| 12 | 0,28 | 0,64 | 0,55 | 0,004 | 0,026 | 13,15 |
| 13 | 0,31 | 0,67 | 0,58 | 0,003 | 0,030 | 12,9 |

Таблица 4.2

Номер плавки и технология получения

| № переплава | Состав электрода | ω , об/мин | Состав присадки | Масса присадки, г |
|-------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 11 | 30Х13 | 0 | Стружка СЧ15 | 500 |
| 12 | 30Х13 | 100 | Стружка СЧ15 | 500 |
| 13 | 30Х13 | 100 | Стружка СЧ15 | 700 |

На момент введения присадки (чугунной стружки) подачу электрического тока прекращали. Условия охлаждения кристаллизатора поддерживали постоянными. Плавки проводили без выведения усадки.

Расходуемые электроды закреплялись в цанговом зажиме приставки вращения. Предварительно очищенный перед каждой плавкой кристаллизатор приподнимали и на поддон устанавливали затравочную шайбу. Поддон закатывали под консоль с электродом. В качестве «затравки» использовали стальную пружину из той же марки, что и переплавляемый электрод. Шайбу прижимали электродом и присыпали экзотермической смесью (ПАМ-3 и молотый рабочий флюс). После этих операций кристаллизатор опускали на поддон и засыпали флюс АНФ-6.

Переплавы проводили без вывода усадки. Условия охлаждения кристаллизатора поддерживали постоянными посредством регулирования расхода воды. Основные технологические параметры переплавов сведены табл. 4.3.

Таблица 4.3

Технологические параметры переплава

| № плавки и ЭШП | Скорость вращения электрода, об/мин | Время плавки, мин | Масса присадки, г | Количество порций при введении присадки | Скорость подачи электрода, мм/мин | Высота слитка, мм | Масса слитка, кг |
|---|-------------------------------------|-------------------|-------------------|---|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| 11 | 0 | 18 | 500 | 1 | 20 | 250 | 12,110 |
| 12 | 100 | 13 | 500 | 1 | 20 | 255 | 12,320 |
| 13 | 100 | 18 | 700 | 8 | 20 | 290 | 14,011 |
| Технологические параметры переплавов: I серия – $D_{\text{Э}} = 40$ мм; $D_{\text{КР}} = 90$ мм; флюс АНФ 6; $I = 800$ А | | | | | | | |

Поверхность всех слитков удовлетворительная, без выраженных дефектов. Слитки после переплава отжигали при температуре 750 °С и подготавливали для дальнейших исследований.

Слитки 11 и 12 порезаны и отполированы для выявления макроструктуры. Для травления использовался реактив Обергоффера.

Сравнение результатов математического моделирования положений линий ликвидус и солидус с расположением высокоуглеродистого слоя в экспериментальных слитках подтверждает сходимость данных моделирования и эксперимента. Сравнение макроструктур слитков и изотерм металлической ванны по данным моделирования приведены на рис. 4.2 и 4.3.

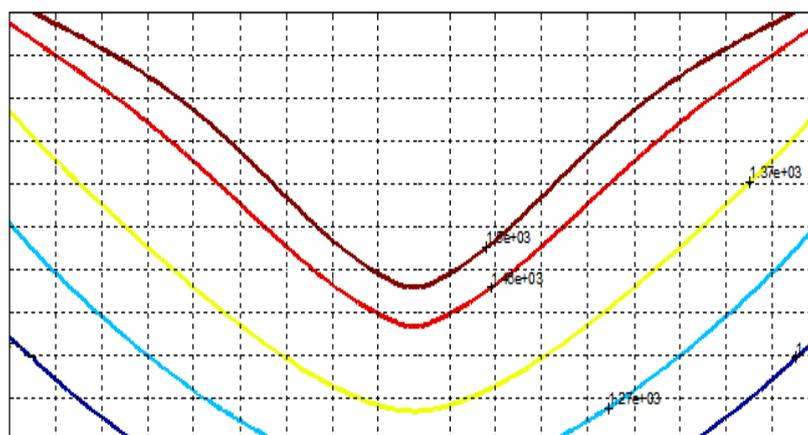
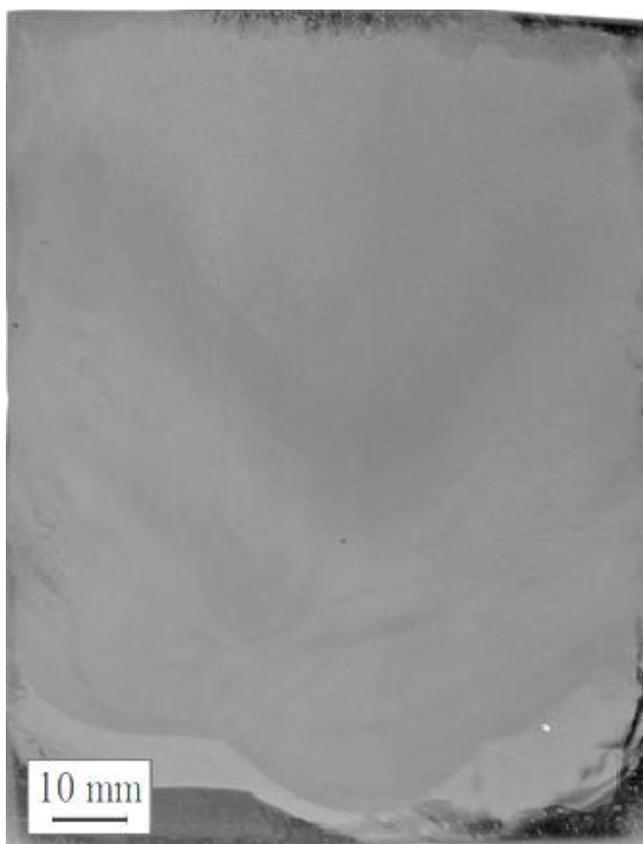


Рис. 4.2. Сравнение макроструктуры слитка, полученного по технологии с введением науглероживающей присадки без вращения расходуемого электрода, с изотермами, полученными при математическом моделировании

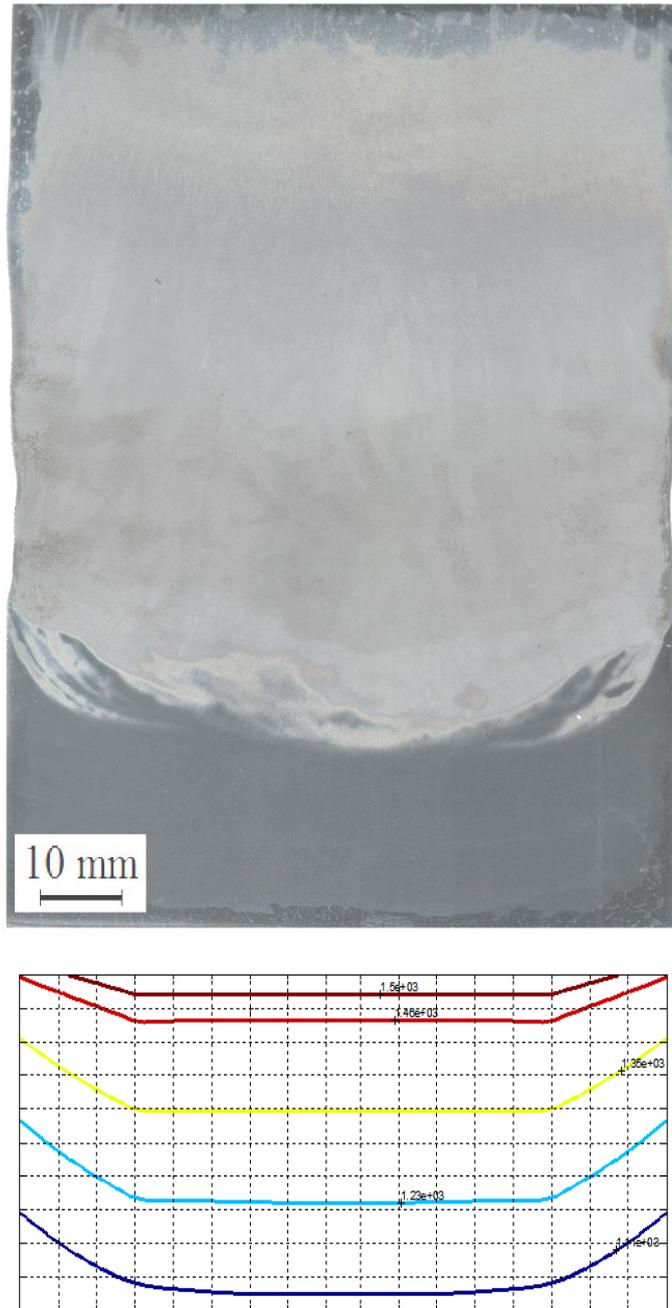


Рис. 4.3. Сравнение макроструктуры слитка, полученного по технологии с введением науглероживающей присадки и вращения расходуемого электрода, с изотермами, полученными при математическом моделировании

Исследование макроструктуры слитков из I серии переплавов показало изменение геометрии фронта кристаллизации. Углеродсодержащая корректирующая присадка создаёт градиент концентраций по содержанию углерода в жидкой металлической ванне и фиксирует фронт кристаллизации, что контрастно выявляется при травлении. 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 так же становится практически горизонтальным.

Полученный в ходе экспериментального переплава № 13 слиток имеет удовлетворительное качество поверхности. Многослойный слиток отжигали при температуре 750 °С и подготавливали для дальнейших исследований. Фото полученного слитка представлено на рис. 4.4.



Рис. 4.4 Многослойный слиток, полученный путём периодической присадки корректирующей присадки

Для определения свойств экспериментального многослойного материала проведена ковка и термическая обработка. После зачистки и отжига слиток отковали на квадрат 35 мм (рис. 4.5). Кованный пруток разрубили пополам и термически обработали по режиму отжига: нагрев в течение 1,5 часов до 750 °С, выдержка при этой температуре в течение 1,5 часов и охлаждение с печью.

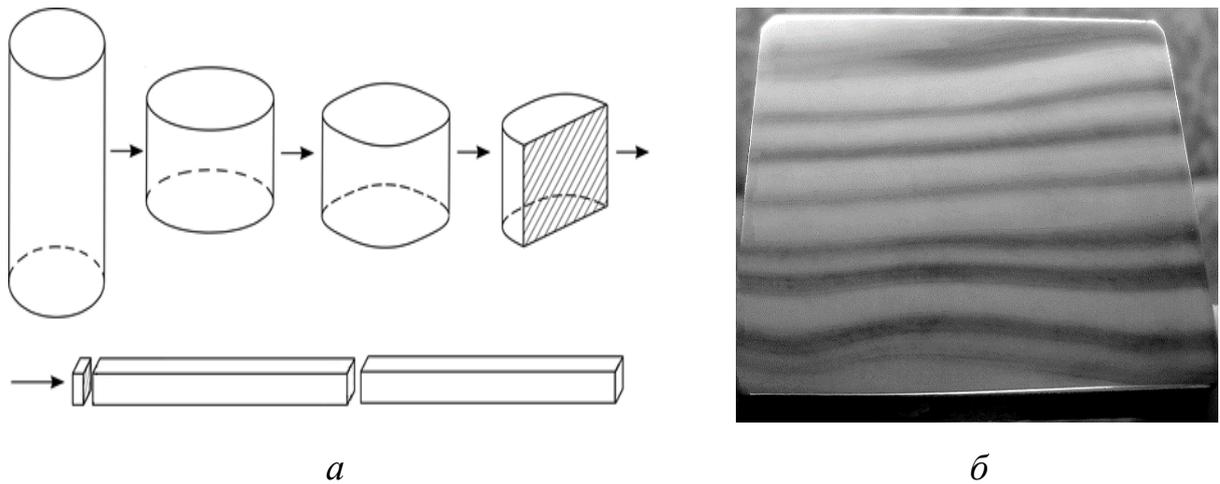


Рис. 4.5. Схема ковки и макроструктура многослойного материала слитка 13: (а) схема ковки до квадрата 35×35; (б) макроструктура продольного сечения прутка

Из полученной поковки изготовлены образцы для проведения комплекса механических испытаний.

4.3. Определение механических характеристик экспериментального многослойного материала

Для проведения механических испытаний термические поковки обработали по следующим режимам:

1 режим – отжиг 1030 °С, охлаждение с печью;

2 режим – отжиг 1030 °С, охлаждение с печью, закалка 1050 °С, охлаждение в масле, отпуск при 400 °С.

Маркировка образцов велась следующим образом: первая цифра – номер режима термической обработки, последующие – номер образца.

Испытаниям на разрыв были подвергнуты 10 образцов многослойного материала (5 образцов по 1 режиму, 5 – по 2 режиму).

Данные по результатам испытаний представлены в табл. 4.4

Для образцов на определение ударной вязкости принята аналогичная маркировка. Результаты сведены в табл. 4.5.

Твёрдость определялась двумя способами – по Бринеллю и по Роквеллу. Результаты измерений сведены в табл. 4.6.

Усреднённые результаты механических испытаний экспериментального материала сведены в табл. 4.7.

Таблица 4.4

Результаты испытаний на определение прочностных характеристик

| Режим термической обработки | № образца | Удлинение после разрыва δ_5 , % | Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | Временное сопротивление разрыву, σ_B , МПа |
|--|------------------------|--|--|---|
| Отжиг 1030 °С, охлаждение с печью | 1.1 | 8,0150 | 995,7500 | 997,8100 |
| | 1.2 | 8,4660 | 997,6300 | 1011,6400 |
| | 1.3 | 8,9750 | 1026,8600 | 1080,7720 |
| | 1.4 | 10,0580 | 1022,3700 | 1064,7400 |
| | 1.5 | 9,7560 | 1013,8400 | 1057,7100 |
| | Среднее | 9,054 | 1011,28 | 1042,53 |
| | Стандартное отклонение | 0,857 | 14,14 | 35,84 |
| | Погрешность | 1,087 | 17,42 | 44,40 |
| Отжиг + закалка 1050 °С, охлаждение в масле, отпуск при 400 °С | 2.1 | 12,8870 | 1360,5300 | 1374,6600 |
| | 2.2 | 12,3960 | 1291,7000 | 1312,2700 |
| | 2.3 | 10,8920 | 1173,8100 | 1214,3100 |
| | 2.4 | 11,9530 | 1273,5600 | 1305,8700 |
| | 2.5 | 11,3790 | 1196,3500 | 1225,4400 |
| | Среднее | 11,9 | 1259,19 | 1286,51 |
| | Стандартное отклонение | 0,79 | 78,68 | 66,64 |
| | Погрешность | 0,98 | 97,58 | 82,52 |

Таблица 4.5

Результаты измерения ударной вязкости

| № образца | КСУ, Дж / см ² (при 20 °С) |
|------------------------|---------------------------------------|
| 1.1 | 17,0 |
| 1.2 | 15,0 |
| 1.3 | 14,0 |
| 1.4 | 12,0 |
| 1.5 | 17,0 |
| Среднее | 15,00 |
| Стандартное отклонение | 2,12 |
| Погрешность | 2,65 |
| 2.1 | 16,0 |

| | |
|------------------------|------|
| 2.2 | 18,0 |
| 2.3 | 21,0 |
| 2.4 | 22,0 |
| 2.5 | 22,0 |
| Среднее | 19,8 |
| Стандартное отклонение | 2,68 |
| Погрешность | 3,33 |

Таблица 4.6

Результаты измерения твердости

| № п/п | Образец 1.1 | | Образец 2.1 | |
|------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Твердость HRC | Твердость HB | Твердость HRC | Твердость HB |
| 1 | 60,0 | 601,0 | 67,0 | 697,0 |
| 2 | 61,0 | 619,0 | 68,0 | 712,0 |
| 3 | 60,5 | 608,0 | 65,0 | 668,0 |
| 4 | 58,5 | 585,0 | 64,0 | 653,0 |
| 5 | 64,0 | 653,0 | 62,0 | 627,0 |
| 6 | 66,0 | 682,0 | 66,0 | 682,0 |
| 7 | 63,0 | 639,0 | 65,0 | 668,0 |
| 8 | 61,0 | 619,0 | 65,0 | 668,0 |
| Среднее | 60,5 | 626,38 | 64,0 | 672,38 |
| Стандартное отклонение | 2,76 | 30,73 | 2,27 | 21,77 |
| Погрешность | 2,32 | 24,52 | 1,91 | 17,50 |

Таблица 4.7

Механические свойства многослойного металлического композиционного материала, полученного методом электрошлакового переплава

| Режим термической обработки | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ_5 , % | HRC | HB | KCU, Дж/см ² |
|---|----------------------|------------------|----------------|-----|-----|-------------------------|
| 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 |

4.4. Определение усталостных характеристик материала

Для построения кривой усталости материала выбраны плоские образцы III типа толщиной 2 мм с галтельным переходом по ГОСТ 25.502-79. Образец с основными размерами представлен на рис. 4.6.

Для исследования подготовлено два набора образцов, вырезанных в разных направлениях слоёв: первый набор – вдоль слоёв, второй – поперек. Все образцы изготовлены из материала, обработанного по 2 режиму термической обработки.

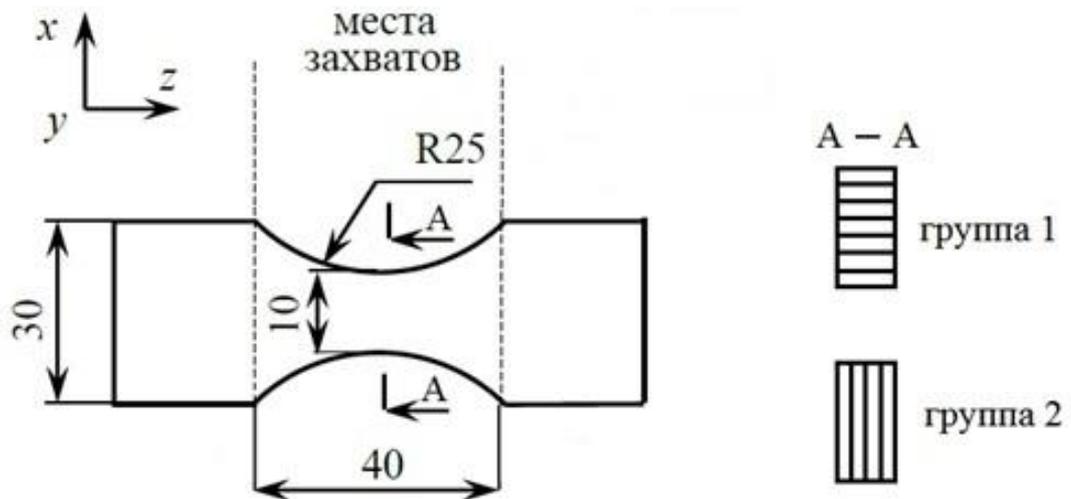


Рис. 4.6. Образец с размерами и расположением слоёв в сечении

Испытательное оборудование скомплектовано на основе электродинамического вибростенда. Установка для испытаний плоских образцов на усталостную долговечность при консольном изгибе представляет собой электромеханическую систему, обеспечивающую гармоническое нагружение образцов, а также одновременное испытание до шести образцов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.7. Главным элементом системы является электродинамический вибростенд LDS V780 1, который установлен через платформу 2, обеспечивающую жесткое закрепление станины вибростенда на фундаменте. Переходная рама 3 закреплена на станине вибростенда, на которой расположены отверстия для

крепления оснастки 4. Процесс нагружения образцов осуществлялся за счет перемещения подвижного стола вибростенда. Через персональный компьютер 5 программно задается режим испытаний образцов. Для поддержания постоянных значений параметров испытаний и контроля условий работы вибростенда используется система управления фирмы Bruel&Kjaer 6. Данные для режима испытаний образцов с персонального компьютера передаются в систему управления, которая преобразует сигнал в напряжение [mV]. Далее сигнал поступает в усилитель 7 и затем на подвижную катушку вибростенда. Для обратной связи на подвижном столе вибростенда установлен однокомпонентный акселерометр 8. Акселерометр регистрирует виброускорения и передает данные в систему управления 6, при этом система управления в режиме реального времени корректирует сигнал при его изменении и поддерживает заданный уровень виброускорений. В испытаниях использовался пьезоэлектрический акселерометр с чувствительностью 10 mV/g. Для охлаждения вибростенда используется вентилятор 9.

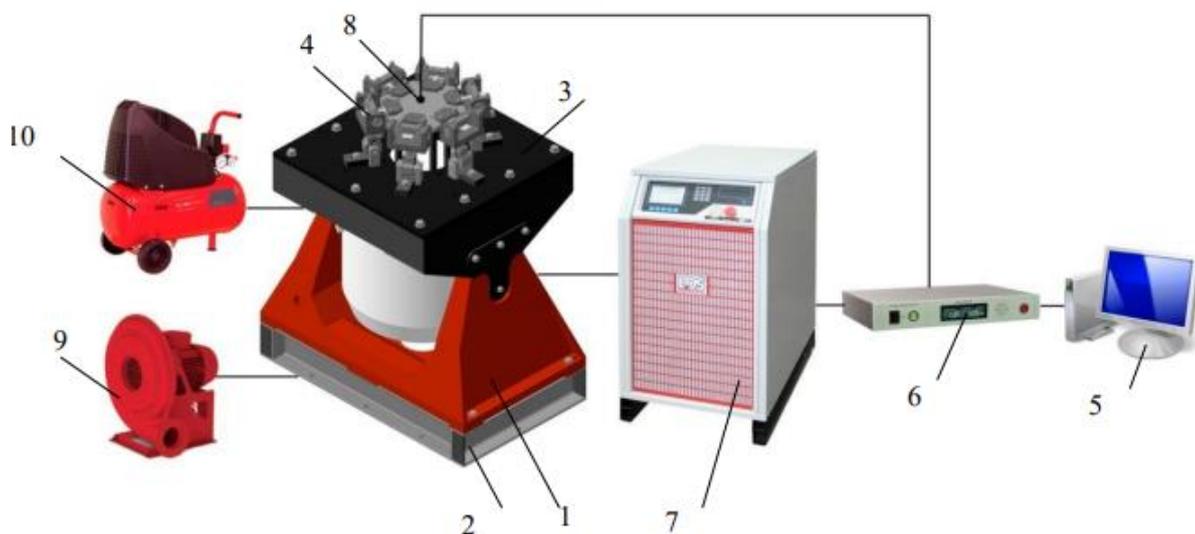


Рис. 4.7. Схема стенда для испытаний материалов и конструкций на усталостную долговечность: 1 – вибростенд LDS V780, 2 – платформа, 3 – переходная рама, 4 – нагрузочные приспособления, 5 – персональный компьютер, 6 – система управления Bruel&Kjaer, 7 – усилитель, 8 – пьезоэлектрический акселерометр, 9 – вентилятор, 10 – компрессор

На рис. 4.8 представлена кинематическая и конструктивная схема оснастки для испытаний. На подвижном столе вибростенда LDS V780 с помощью колон 1 и болтов жестко закреплена плита шестиугольной формы 2. Четыре плоских образца 3 одним концом прижимались накладками 4, что обеспечивало консольное закрепление. Другой конец образцов на расстоянии b от заделки фиксировался в зажимах 5 и 6, установленных в подшипниках. Приспособление для консольного изгиба образцов крепится к плите переходной рамой 7, которая жестко закреплена к неподвижной станине вибростенда. За счет подшипников обеспечивается свободный поворот на угол α зажимов 5 и 6. Нижний подшипниковый узел обеспечивает угловые повороты θ , обусловленные изменением расстояния a в процессе изгиба образцов при осевом смещении подвижной плиты.

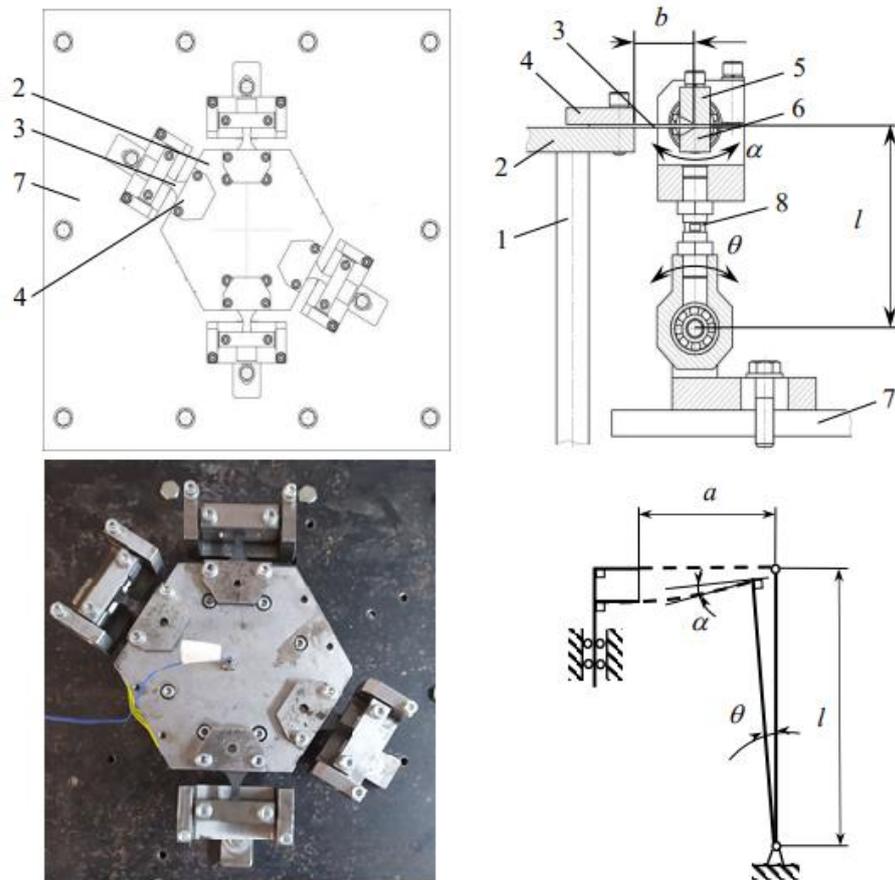


Рис. 4.8. Конструктивная и кинематическая схемы нагрузочного приспособления, реализующего консольный изгиб образцов

Кинематическая схема, показанная на рис. 4.9 в правом нижнем углу, исключает действие растягивающих сил при изгибе. Расстояние l ввиду различной формы образцов регулируется с помощью винта 8, что позволяет исключить начальный статический прогиб образцов.

Первый набор насчитывает 29 образцов (за исключением тестовых Т1 и Т2). Для каждого образца измерены толщины в трех сечениях: А-А, Б-Б, В-В (рис. 4.10). Результаты измерений сведены в табл. 4.8. Для измерений толщины использовался цифровой штангенциркуль с точностью измерений 0,01 мм.

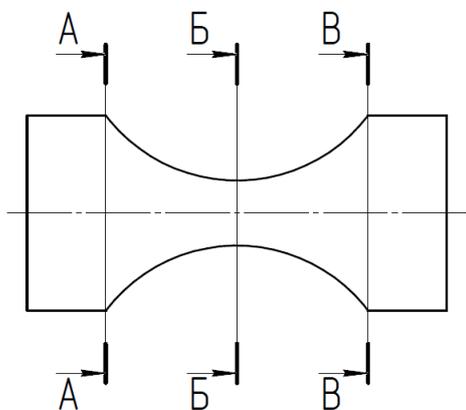


Рис. 4.9. Расположение сечений на образце

Таблица 4.8

Толщины образцов из первого набора в трех сечениях

| № образца | Толщина в сечении А-А, мм | Толщина в сечении Б-Б, мм | Толщина в сечении В-В, мм |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 2,01 | 2,00 | 2,01 |
| 2 | 2,01 | 2,00 | 2,01 |
| 3 | 2,02 | 2,01 | 2,02 |
| 4 | 1,99 | 1,99 | 2,01 |
| 5 | 2,02 | 2,02 | 2,03 |
| 6 | 2,01 | 2,01 | 2,01 |
| 7 | 2,01 | 2,00 | 1,99 |
| 8 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| 9 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| 10 | 2,01 | 2,00 | 2,01 |
| 11 | 2,02 | 2,00 | 2,01 |
| 12 | 2,01 | 2,02 | 2,02 |
| 13 | 2,02 | 2,01 | 2,01 |
| 14 | 2,02 | 2,00 | 2,02 |

| | | | |
|----|------|------|------|
| 15 | 2,01 | 2,01 | 2,01 |
| 16 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| 17 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| 18 | 2,01 | 2,01 | 2,01 |
| 19 | 2,01 | 2,00 | 2,00 |
| 20 | 1,99 | 2,00 | 1,99 |
| 21 | 2,01 | 2,00 | 2,01 |
| 22 | 2,01 | 2,00 | 2,01 |
| 23 | 2,01 | 2,01 | 2,01 |
| 24 | 2,02 | 2,00 | 2,01 |
| 25 | 2,02 | 2,00 | 2,00 |
| 26 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| 27 | 2,03 | 1,97 | 2,00 |
| 28 | 2,01 | 2,00 | 1,99 |
| 29 | 2,01 | 1,99 | 2,00 |

Проведена селективная выборка образцов, выделено пять групп по четыре образца, схожих по толщинам в сечениях, оставшиеся образцы выделены под компенсаторы. Образцы-компенсаторы ставились вместо разрушенного в ходе испытаний образца для симметричного нагружения стэнда.

На основе полученного коэффициент пересчета, а также в связи с ограниченным количеством образцов, выбрано пять уровней нагружения, соответствующих перемещениям вибростола на уровнях 1, 2 и 3 мм, а также на уровнях 1,5 и 1,8 мм для уточнения кривой усталости на низких уровнях нагрузок. Пересчитанные перемещения вибростола в максимальные напряжения в образцах представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Выбор уровней нагружения и образцов

| № эксперимента | А, мм | σ , МПа | № образца | | | |
|----------------|-------|----------------|-----------|----|----|----|
| | | | 1 | 2 | 10 | 21 |
| 1 | 3 | 720 | 1 | 2 | 10 | 21 |
| 2 | 2 | 480 | 8 | 9 | 16 | 17 |
| 3 | 1,8 | 432 | 11 | 13 | 22 | 24 |
| 4 | 1,5 | 360 | 3 | 12 | 14 | 26 |
| 5 | 1 | 240 | 6 | 15 | 18 | 23 |

База испытаний $N = 2 \cdot 10^6$ циклов. При испытаниях регистрировалось количество циклов до полного разрушения образцов. Испытания проводились либо до разрушения образцов, либо до достижения базы испытаний. Полученные долговечности образцов представлены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Долговечности образцов для разных уровней нагружения

| Перемещение, мм | 3 | 2 | 1,8 | 1,5 | 1 |
|---------------------|--------|--------|---------|-----------|-----------|
| Напряжение, МПа | 720 | 480 | 432 | 360 | 240 |
| Количество циклов N | 12 400 | 70 040 | 66 460 | 2 142 300 | 2 021 020 |
| | 16 320 | 66 600 | 250 300 | 2 142 300 | 2 021 020 |
| | 14 340 | 70 040 | 136 500 | 210 600 | 2 021 020 |
| | 13 280 | 524 80 | 47 300 | 781 920 | 2 021 020 |
| | — | — | 86 400 | — | — |
| | — | — | 59 680 | — | — |

Характерное место разрушения образцов из первого набора показано на рис. 4.10.



Рис. 4.10 Характерное место разрушения образцов из первого набора

Второй набор для проведения усталостных испытаний насчитывает 15 образцов. Результаты измерений сведены в табл. 4.11. Для измерений толщины использовался цифровой штангенциркуль с точностью измерений 0,01 мм.

Таблица 4.11

Толщины образцов из второго набора в трех сечениях

| № образца | Толщина в сечении А-А, мм | Толщина в сечении Б-Б, мм | Толщина в сечении В-В, мм |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A1 | 2,00 | 1,95 | 1,90 |
| A2 | 2,02 | 1,90 | 2,15 |
| A3 | 2,05 | 1,94 | 1,99 |
| A4 | 1,98 | 2,00 | 2,08 |
| A5 | 1,92 | 1,89 | 1,90 |
| A6 | 2,02 | 1,88 | 1,94 |
| A7 | 2,02 | 1,88 | 2,02 |
| A8 | 2,00 | 1,95 | 2,14 |
| A9 | 1,98 | 1,93 | 1,98 |
| A10 | 2,04 | 1,91 | 1,92 |
| A11 | 2,11 | 2,00 | 2,07 |
| A12 | 2,07 | 1,95 | 2,08 |
| A13 | 2,14 | 2,02 | 2,15 |
| A14 | 2,08 | 2,00 | 2,03 |
| A15 | 1,93 | 1,91 | 2,04 |

Для второго набора образцов селективная выборка не проводилась. Образцы А1-А4 использовались в качестве компенсаторов при испытаниях первого набора образцов, когда разрушились образцы-компенсаторы № 4, 5, 20, 25 и 27. В связи с этим образцы А1-А4 не испытывались. Из образцов А5-А15 было выделено две группы по четыре образца, оставшиеся образцы выделены под компенсаторы.

На основе полученного коэффициента пересчета, а также в связи с ограниченным количеством образцов, выбрано два уровня нагружения, соответствующих перемещениям вибростола на уровнях 2 и 1,5 мм. Пересчитанные перемещения вибростола в максимальные напряжения в образцах представлены в табл. 4.12. На рис. 4.11 представлено характерное место разрушения образцов из второго набора.

Таблица 4.12

Выбор уровней нагружения и образцов

| № эксперимента | А, мм | σ, МПа | № образца | | | |
|----------------|-------|--------|-----------|-----|-----|-----|
| | | | А5 | А6 | А7 | А8 |
| 1 | 2 | 480 | А5 | А6 | А7 | А8 |
| 2 | 1,5 | 360 | А9 | А11 | А12 | А14 |



Рис. 4.11. Характерное место разрушения образцов из второго набора

Полученные долговечности образцов представлены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Долговечности (числа циклов) образцов для разных уровней нагружения

| Перемещение, мм | 2 | 1,5 |
|---------------------|--------|---------|
| Напряжение, МПа | 480 | 360 |
| Количество циклов N | 17 080 | 107 300 |
| | 23 180 | 10 760 |
| | 36 040 | 52 700 |
| | 35 260 | 70 380 |

Построение кривой усталости по методике Басквина

Уравнение Басквина имеет вид:

$$N = \begin{cases} N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1} \\ \infty & \text{при } \sigma_a < \sigma_{-1}. \end{cases}$$

В результате выполненных расчетов получены уравнения Басквина для первого и второго набора образцов (рис. 4.12):

$$N_1 = \begin{cases} N_0 \left(\frac{240}{\sigma_a} \right)^{4,51} & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1} \\ \infty & \text{при } \sigma_a < \sigma_{-1}. \end{cases}$$

$$N_2 = \begin{cases} N_0 \left(\frac{360}{\sigma_a} \right)^{3,48} & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1} \\ \infty & \text{при } \sigma_a < \sigma_{-1}. \end{cases}$$

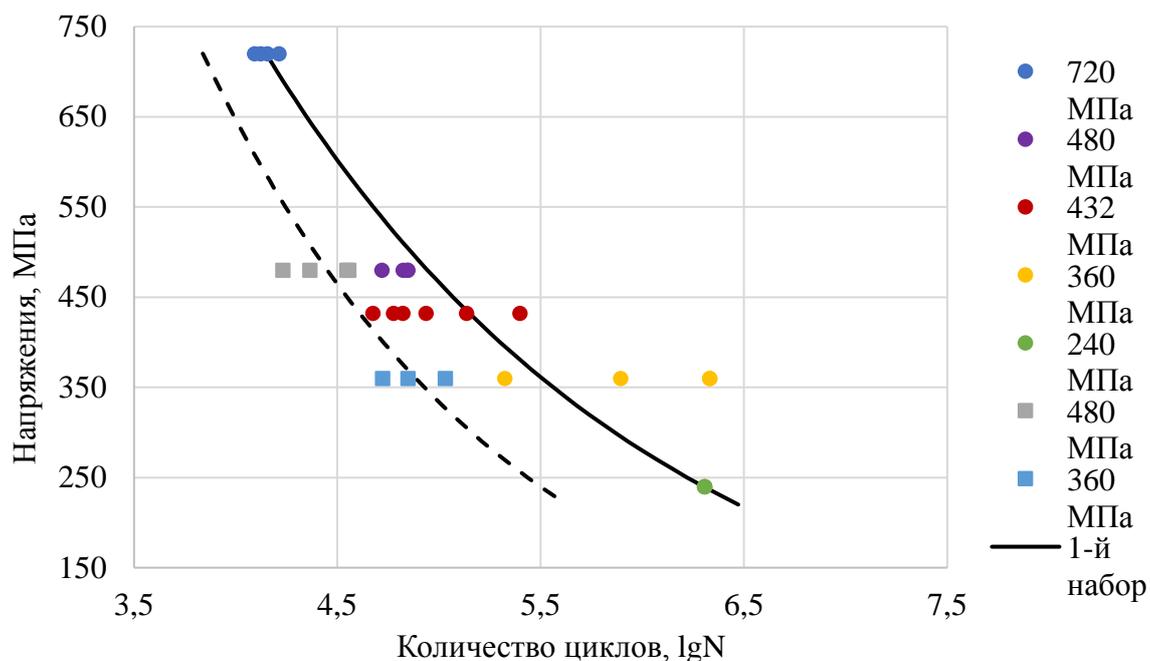


Рис. 4.12. Кривые усталости для первого и второго набора образцов по уравнению Басквина

На основе полученных кривых усталости можно сделать вывод, что при консольном изгибе долговечность образцов из второго набора меньше, чем долговечность образцов из первого набора.

4.5. Практическое применение многослойного материала

Исторические особенности г. Златоуста, где проведено большинство работ из представленной диссертации, заключаются в наличии большого количества малых и средних предприятий, занимающихся изготовлением холодного украшенного оружия. Постоянно ведётся поиск новых химических составов стали для изготовления клинков. Для многих производств отдельным направлением является изготовление слоистых заготовок, повторяя исторические дамаски и булаты. Разделение на «дамаск» и «булат» зависит от способа формирования многослойной структуры: кузнечной сваркой пластин из разных по составу сталей получают дамаск, жидкофазными способами – булат.

Современное представление о булате сформировалось на основе изучения индо-персидского оружия эпохи персидской династии Сефевидов (1502-1722) [121, 122]. С дамасской или булатной сталью связано понятие высококачественной стали, для которой послековки, полировки и травления характерна своеобразная макроструктура – узор и высокая режущая способность, являющаяся главной отличительной особенностью булатного оружия [123].

Первую попытку классифицировать дамасские стали по способу получения сделал П.П. Аносов в своей работе «О булатах». Согласно приведенной им классификации дамасские (булатные) стали подразделяются на ложные, искусственные или сварочные и настоящие. Большой интерес с точки зрения изучения свойств и структуры дамасских (булатных) сталей представляют работы зарубежных учёных. Пионером научных металлофизических исследований структуры булата был австрийский металлург Шокке. Известный швейцарский путешественник Генри Мозер, собравший великолепную коллекцию более 2000 булатных клинков [124, 125].

Актуальность «булатной» темы – не только исторический интерес. Идеи, заложенные в выборе компонентов для получения булата и в способах его производства, и сегодня служат научной основой для разработки самых различных технологических процессов получения сталей, сплавов и композиционных материалов с превосходящими дамасскую (булатную) характеристиками. Так, в конце XVIII в. шведский металлург Свен Ринман, разрабатывая способы травления дамасских клинков, впервые выделил углерод из стали; во второй половине XIX столетия, исследуя технологию персидского булата, Морис Бреан во Франции и П.П. Аносов в России приготовили первые легированные стали. Металлографическое исследование булата Д.К. Черновым – страстным собирателем булатных клинков – послужило стимулом для его открытия кристаллической структуры стального слитка. Можно смело утверждать, что булат – первый композиционный материал, изготовленный человеком.

Использовать электрошлаковые технологии для формирования высококачественных и высокотехнологичных многослойных материалов предложили сотрудники кафедры «Техника и технологии производства материалов» (бывшая кафедра «Общая металлургия») филиала ЮУрГУ в г. Златоусте – Г.А. Вачугов и В.И. Чуманов.

Сотрудничество с предприятиями, производящими холодное украшенное оружие ООО «Златоусть», ООО «Златоустовский инновационный центр «БулатградЪ», ведётся в направлении разработки режимов деформации и подбора температурных режимов термической обработки многослойных заготовок, что подтверждено актами о внедрении результатов диссертационной работы (приложения А, Б).

Примером применения многослойного материала является его использование в качестве получения клинков холодного украшенного оружия. На рис. 4.13 и 4.14 представлены фотографии ножей, изготовленных из нового многослойного материала.



Рис. 4.13. Лезвие ножа, изготовленное из многослойной заготовки, полученной методом электрошлакового переплава



Рис. 4.14. Лезвие ножа, изготовленное из многослойной заготовки, полученной методом электрошлакового переплава

Выводы к главе 4

1. Экспериментальным путём установлено, что применение технологии вращения расходуемого электрода влияет на глубину и геометрию жидкой металлической ванны при электрошлаковом переплаве. Подтверждено, что смещение места доставки капель электродного металла ближе к стенке кристаллизатора уменьшает глубину металлической ванны и способствует формированию горизонтального фронта кристаллизации.

2. Переплав с вращением расходуемого электрода способствует уменьшению глубины металлической ванны и формированию горизонтального фронта кристаллизации, что позволяет снизить протяженность переходной зоны при формировании многослойной заготовки. Фиксация металлической ванны науглероживающей присадкой показала, что при формировании заготовки без вращения электрода протяжённость переходной зоны составляет 78 мм, по технологии с вращением – 28 мм.

3. Получен слиток многослойного металлического материала со сниженной протяжённостью переходной зоны между слоями формируемой

заготовки. Определены его механические характеристики (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость, твёрдость) при различных режимах термической обработки.

4. Установлено, что усталостные характеристики многослойного металлического материала зависят от расположения слоёв в сечении испытываемых образцов.

5. ВЕДЕНИЕ ДОБАВОК, КОРРЕКТИРУЮЩИХ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЖИДКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЫ, С ПОВЕРХНОСТИ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА

5.1. Обоснование способа введения частиц, корректирующих химический состав, в каплю электродного металла

В случае введения упрочняющих твёрдых частиц, модификаторов, микролегирования, т.е. применения активных при температурах переплава веществ и соединений, необходимо исключить взаимодействие с рафинирующим флюсом. Для этого рационально осуществлять введение специальных присадок в жидкий металл. В поиске наиболее эффективного способа введения добавок в жидкую металлическую ванну при получении многослойных слитков вызывает интерес место каплеобразования. При условии радиального течения плёнки жидкого металла на торце оплаваемого электрода капли образуются по его периметру. Следовательно, жидкий металл поверхностного слоя участвует в каплеобразовании и минимально контактирует с рабочим флюсом. Исходя из этого, предположено – если добавки, необходимые для изменения химического состава металлической ванны формируемого слитка, разместить на поверхности расходуемого электрода – они будут попадать непосредственно в каплю. В этом случае капля электродного металла выступает транспортёром, который позволит доставить необходимые материалы в металлическую ванну, минуя контакт с рабочим флюсом. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 5.1. Вращение расходуемого электрода позволяет обеспечить радиальное течение плёнки жидкого металла и является наиболее перспективным на ближайшее время.

Усвоение частиц присадки при рафинирующем процессе становится возможным с учётом степени рафинирующей способности переплава на границах взаимодействия жидкого металла и шлака. Многолетний опыт исследования показывает, что основное рафинирование происходит на

границе шлак-плёнка жидкого металла на оплавляемом торце электрода. Анализ результатов представленных исследований показал, что введение твёрдых дисперсных частиц в виде карбидов и иных соединений, от которых происходит рафинирование в процессе электрошлакового переплава, с поверхности переплавляемого электрода не имеет альтернативы. Представленные результаты подтверждают предположения исследователей Г.А. Вачугова, В.И. Чуманова и др., предполагающих превалирование рафинирования от неметаллических включений на границе оплавляемая поверхность-шлак.

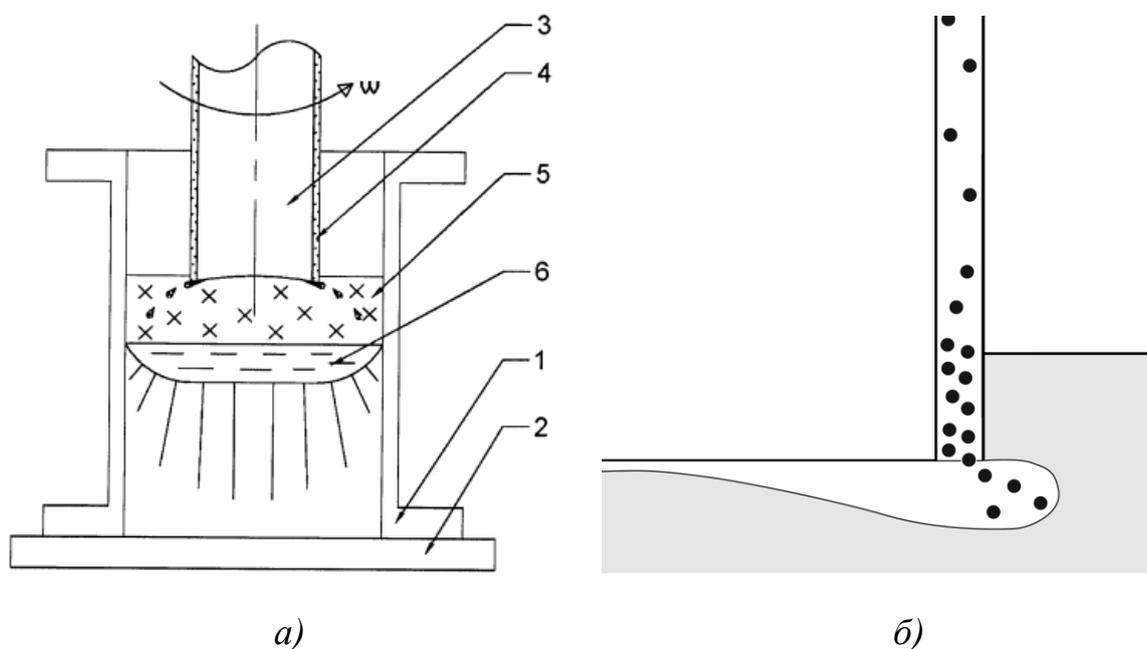


Рис. 5.1. Способ введения частиц в металлическую каплю при электрошлаковом переплаве: *а)* – схема электрошлакового переплава слитка с нанесённым покрытием: 1 – кристаллизатор, 2 – поддон, 3 – расходуемый электрод, 4 – покрытие с частицами добавки, 5 – шлаковая ванна, 6 – жидкая металлическая ванна; *б)* – схема усвоения присадочных материалов с поверхности электрода

В процессе рафинирования металла при электрошлаковом переплаве существует три поверхности, на которых происходит взаимодействие между жидкими металлом и шлаком:

- 1 – плёнка жидкого металла на торце переплавляемого электрода / шлак;
- 2 – капля электродного металла / шлак;
- 3 – ванна жидкого металла / шлак.

Для установления границы с максимальной рафинирующей способностью необходимо сравнить количество включений в электродном металле, капле, оторвавшейся с электрода и не успевшей пройти сколь-нибудь большое расстояние, в металле металлической ванны и в слитке. Для этого был организован опыт, целью которого было получить образцы металла с разных этапов рафинирования [106]. Отбор заключался в следующем: под электрод подводили пробницу и улавливали капли, также брали пробы из ванны жидкого металла. Полученные пробы исследовались на количество включений. Установлено, что наибольшее рафинирование от неметаллических включений происходит при оплавлении электрода и в меньшей степени – на всех других поверхностях. Оценивая степень рафинирования переплавляемого металла от неметаллических включений, установлено, что до 80 % включений, адсорбированных при переплаве, переходят в шлак с поверхности плёнки жидкого металла на торце электрода [107, 126], порядка 20 % – из капель электродного металла при прохождении через шлак и при всплывании из ванны жидкого металла. По этой причине рационально использовать каплю электродного металла для переноса присадки различного состава в жидкую металлическую ванну.

Предлагаемая технология исключает полное рафинирование от корректирующих добавок, которые могут рассматриваться как неметаллические включения, т.к. они не попадают на границу максимальной очистки металла.

Принципиальная возможность легирования переплавляемого металла с поверхности электрода заключается в сочетании следующих факторов:

- 1) Введение материала присадки в каплю электродного металла, формируемую на торце расходуемого электрода / шлак;

2) Удовлетворительное смачивание между железоуглеродистым расплавом и веществом корректирующей присадки.

Возможность усвоения частиц корректирующей добавки каплей электродного металла определяется параметрами смачивания между жидким металлом и материалом присадки. Опираясь на работы по дисперсионному упрочнению отливок твёрдыми дисперсными частицами, показано хорошее усвоение карбидов вольфрама, титана, бора, карбонитридов титана при получении градиентных функциональных материалов.

Указанные соединения тугоплавких карбидов были выбраны на основании обзора ряда работ по изучению их смачиваемости железоуглеродистыми расплавами. Данный параметр позволяет осуществить процесс дисперсного упрочнения матрицы основного металла с образованием химической связи на границе «дисперсная частица-металл». Карбид титана имеет достаточно высокие показатели смачиваемости металлическими расплавами различного химического состава, величина краевого угла смачивания составляет $20...80^\circ$ [127–129]. Данное явление исследовали в различных технологиях металлургического производства: при непрерывной разливке [130], разливке в направлении, обратном гравитационному полю, получении литых деталей [131]. При этом во всех указанных случаях введение карбида титана позволяет повысить показатели физико-механических свойств при определенной концентрации.

Еще более высокими показателями смачиваемости железоуглеродистыми расплавами обладает карбид вольфрама. В работах [132–134] показано, что показатель краевого угла смачивания карбида вольфрама достигает 0° , что свидетельствует о полном химическом взаимодействии рассматриваемых компонентов. Положительное влияние на показатели физико-механических свойств металла при введении дисперсных частиц карбида вольфрама представлено в работах [133, 135, 136].

Карбид бора также широко используется для дисперсного упрочнения металлических расплавов [137–139], что свидетельствует о его смачиваемости железоуглеродистыми расплавами.

Основным фактором для достижения изотропии свойств и состава металла при введении указанных дисперсных частиц является их контролируемое введение и кристаллизация расплава. Указанные требования могут быть достигнуты при электрошлаковом переплаве ввиду его технологических особенностей – равномерной скорости плавления, т.е. контролируемой подачи электрода в расплавленный флюс, и высокой скорости кристаллизации получаемого слитка, т.е. отсутствии конвективных потоков в металле. Несмотря на различную плотность указанных дисперсных частиц, их перенос в получаемый слиток будет достигаться за счет их смачиваемости каплями электродного металла.

Практически оценить возможность применения технологии электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода вокруг собственной оси для получения многослойных заготовок возможно путем проведения ряда экспериментов. Данная технология может быть исполнена в нескольких вариациях: введением корректирующих присадок в плавильное пространство печи и переплавом расходуемого электрода с нанесённым специальным покрытием, содержащим корректирующие частицы.

Возможность усвоения материалов, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, с поверхности электрода проверяется путём переплава электродов с нанесёнными покрытиями, содержащими соединения WC, TiC и B₄C. Плотность карбидов: вольфрама – 15,77 г/см³, титана – 4,93 г/см³, бора – 2,48 г/см³. Размер частиц карбидов WC – 1...3 мкм, TiC – 1...2 мкм, B₄C – 0,5...1 мкм. Плотность флюса АНФ при температуре 1700 °С – 2,53 г/см³.

Следует отметить, что корректирующее добавки по высоте электрода наносятся дифференцируемо. Для формирования чёткой границы необходимо основную часть материала добавки разместить в первичной зоне контакта с

флюсом, затем количество можно уменьшать. Это позволит резко повысить концентрацию вводимого компонента в металлической ванне и сформировать минимальную протяжённость переходной зоны между формируемыми слоями.

Проводились следующие виды переплавов с введением корректирующих присадок:

– эталонные переплавы с прямой подачей на шлак карбидов и вращением расходуемого электрода;

– опытные переплавы расходуемых электродов со специальным покрытием, содержащим корректирующие присадки, и применением технологии вращения.

5.2. Апробация способа введения частиц, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны, через объём рабочего флюса

Возможность усвоения материалов, корректирующих химический состав жидкой металлической ванны с поверхности электрода, проверялась путём переплава электродов с нанесёнными покрытиями, содержащими порошки WC, TiC и B₄C. Специальное покрытие состоит из смеси жидкого стекла (водный щелочной раствор Na₂O(SiO₂)) и порошков специальных карбидов. Покрытие наносилось на электрод в области, которая после переплава сформирует специальный слой. Для проверки возможности введения корректирующих добавок с поверхности расходуемого электрода была проведена серия плавов. В качестве эталонов проведено три переплава, в которых проводилась дача корректирующей добавки на шлак при реализации вращения расходуемого электрода (№ 201-э, 206-э т 211-э). Для исследования усвоения добавок, размещённых на поверхности электрода, было проведено 12 переплавов (табл. 5.1).

Полученные в ходе опытных переплавов слитки были термически обработаны по режиму отжига: нагрев до 900° С, выдержка 2 часа и охлаждение с печью. Затем их распилили по диаметру и отшлифовали для определения химического состава. Химический состав приведён в табл. 5.2-5.4. Протяжённость слоя, насыщенного металлическим компонентом карбида, для полученных слитков составляет 40-45 мм.

Таблица 5.1

Номер плавки и технология получения

| № переплава | Марка стали электрода | ω , об/мин | Корректирующая присадка | | Масса присадки, г |
|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|------------------|-------------------|
| | | | На шлак | В покрытия | |
| 201-э | 40X13 | 64 | WC | – | 30 |
| 202 | 40X13 | 64 | – | WC | 30 |
| 203 | 40X13 | 64 | – | WC | 30 |
| 204 | 40X13 | 64 | – | WC | 30 |
| 205 | 40X13 | 64 | – | WC | 30 |
| 206-э | 40X13 | 64 | TiC | – | 30 |
| 207 | 40X13 | 64 | – | TiC | 30 |
| 208 | 40X13 | 64 | – | TiC | 30 |
| 209 | 40X13 | 64 | – | TiC | 30 |
| 210 | 40X13 | 64 | – | TiC | 30 |
| 211-э | 40X13 | 64 | B ₄ C | – | 30 |
| 212 | 40X13 | 64 | – | B ₄ C | 30 |
| 213 | 40X13 | 64 | – | B ₄ C | 30 |
| 214 | 40X13 | 64 | – | B ₄ C | 30 |
| 215 | 40X13 | 64 | – | B ₄ C | 30 |

Химический состав электродов для переплавов: С – 0,43 %, S – 0,015 %, P – 0,013 %, Si – 0,245%, Mn – 0,450 %, Cr – 12,817%, W – 0,008 %, Ti – 0,001 %, B – 0,001 %

Технологические параметры переплавов:
II серия – D_Э = 40 мм; D_{КР} = 120 мм; флюс АНФ 6; I = 800 А

Таблица 5.2

Химический состав специального слоя в слитках, с введением корректирующей добавки WC мас. %

| № переплава | C | Si | Mn | Cr | W |
|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 201-э | 0,445 | 0,237 | 0,420 | 12,679 | 0,336 |
| 202 | 0,456 | 0,344 | 0,413 | 12,427 | 0,557 |
| 203 | 0,446 | 0,346 | 0,429 | 12,727 | 0,573 |
| 204 | 0,453 | 0,347 | 0,416 | 12,767 | 0,529 |
| 205 | 0,440 | 0,344 | 0,416 | 12,707 | 0,546 |

Таблица 5.3

Химический состав специального слоя в слитках, с введением корректирующей добавки TiC, мас. %

| № переплава | C | Si | Mn | Cr | Ti |
|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 206-э | 0,443 | 0,241 | 0,433 | 12,721 | 0,124 |
| 207 | 0,438 | 0,293 | 0,446 | 12,684 | 0,295 |
| 208 | 0,440 | 0,286 | 0,432 | 12,725 | 0,291 |
| 209 | 0,451 | 0,270 | 0,432 | 12,702 | 0,310 |
| 210 | 0,441 | 0,252 | 0,421 | 12,683 | 0,334 |

Таблица 5.4

Химический состав специального слоя в слитках, с введением корректирующей добавки B₄C, мас. %

| № переплава | C | Si | Mn | Cr | B |
|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 211-э | 0,439 | 0,238 | 0,419 | 12,427 | 0,067 |
| 212 | 0,446 | 0,347 | 0,416 | 12,767 | 0,131 |
| 213 | 0,443 | 0,344 | 0,416 | 12,707 | 0,140 |
| 214 | 0,441 | 0,34 | 0,415 | 12,588 | 0,129 |
| 215 | 0,451 | 0,33 | 0,413 | 12,567 | 0,121 |

В табл. 5.5 приведены данные об усвоении корректирующей присадки. Из представленных данных следует, что усвоение корректирующих добавок происходит как в случае прямой дачи на шлак, так и в случае введения с поверхности расходоуемого электрода. 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 покрытия электрода – 85 %. Для карбида титана – 22,4 % и 55,7 % соответственно. Карбид бора усвоился на 12,7 % и 24,6 % соответственно. Хорошее усвоение карбида вольфрама объясняется его высоким удельным весом, более чем в 4 раза превышающим удельный вес флюса. Усвоение титана и бора в случае прямой дачи можно объяснить активным перемешиванием флюса при вращении электрода.

Оценивалась и равномерность распределения основного элемента в сформированном слое. Для этого определялся состав в трёх точках по сечению слитка: центр, середина радиуса и край. Данные о распределении W, Ti и B в табл. 5.6. Колебания концентрации элемента в слое составляет 5...8 %.

Таблица 5.5

Технологические параметры переплавов с введением корректирующих добавок с поверхности электрода

| № плавки ЭШП | Скорость вращения электрода, об/мин | Масса присадки, г | Высота слитка, мм | Масса слитка, кг | % усвоения добавки |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| 201-э | 64 | 30 | 118 | 10,123 | 52,028 |
| 202 | 64 | 30 | 131 | 11,256 | 86,376 |
| 203 | 64 | 30 | 126 | 10,830 | 88,905 |
| 204 | 64 | 30 | 114 | 9,782 | 82,047 |
| 205 | 64 | 30 | 122 | 10,451 | 84,675 |
| 206-э | 64 | 30 | 128 | 10,985 | 22,448 |
| 207 | 64 | 30 | 118 | 10,167 | 53,487 |
| 208 | 64 | 30 | 119 | 10,198 | 52,764 |
| 209 | 64 | 30 | 115 | 9,865 | 56,188 |
| 210 | 64 | 30 | 127 | 10,870 | 60,494 |
| 211-э | 64 | 30 | 129 | 11,055 | 12,714 |
| 212 | 64 | 30 | 125 | 10,756 | 24,741 |
| 213 | 64 | 30 | 121 | 10,362 | 26,483 |
| 214 | 64 | 30 | 119 | 10,199 | 24,329 |
| 215 | 64 | 30 | 114 | 9,786 | 22,927 |

Распределение элементов по сечению слитков, 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 | 0,117 | 0,120 | 0,133 | 0,124 |
| 207 | 0,283 | 0,289 | 0,312 | 0,295 |
| 208 | 0,276 | 0,282 | 0,314 | 0,291 |
| 209 | 0,303 | 0,297 | 0,331 | 0,311 |
| 210 | 0,313 | 0,327 | 0,360 | 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 |

Химический состав отработанных флюсов с опытных переплавок исследовали на эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer). Анализ флюса показал, что в составе проб с переплавок 207 и 210 содержится 2,1 % и 1,7 % TiO_2 соответственно (табл. 5.7).

Химический состав флюсов ЭШП, % масс.

| № пробы | Соединение | | | | | | | | |
|---------------|------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|------|------------------|
| | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MnO | TiO ₂ |
| Исходный флюс | Осн. | 28,67 | 1,2 | – | – | 0,21 | – | – | – |
| 207 | Осн. | 23,0 | 6,14 | 0,25 | 0,28 | 0,33 | 0,03 | 0,36 | 2,11 |
| 210 | Осн. | 23,5 | 6,24 | 0,20 | 0,29 | 0,37 | 0,04 | 0,04 | 1,73 |

Карбид вольфрама во флюсе не найден. В виду высокого процента содержания вольфрама в опытных слитках можно сделать вывод о его усвоении.

Карбид бора по используемой методике определить невозможно, так как проба флюса сплавляется с бурой. Усвоение бора определяется только через повышение его концентрации в слитках.

5.3. Исследование микроструктуры слитков, полученных по технологии введения корректирующих добавок с поверхности расходующего электрода

Микроструктура опытных слитков исследовалась с целью определения того, в каком виде находятся материалы корректирующей присадки в полученных слитках. Анализ был проведён на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 700IF.

Исследование образцов с карбидом вольфрама в качестве корректирующей добавки показало, что карбид растворяется в металлической матрице и частично сохраняется в виде соединения (рис. 5.2, 5.3). Карбид титана преобразуется в карбонитрид титана (рис. 5.4), нитрид титана (рис. 5.5) и частично восстанавливается в металлическую матрицу (рис. 5.6). Бор определяется в металлической матрице (рис. 5.7).

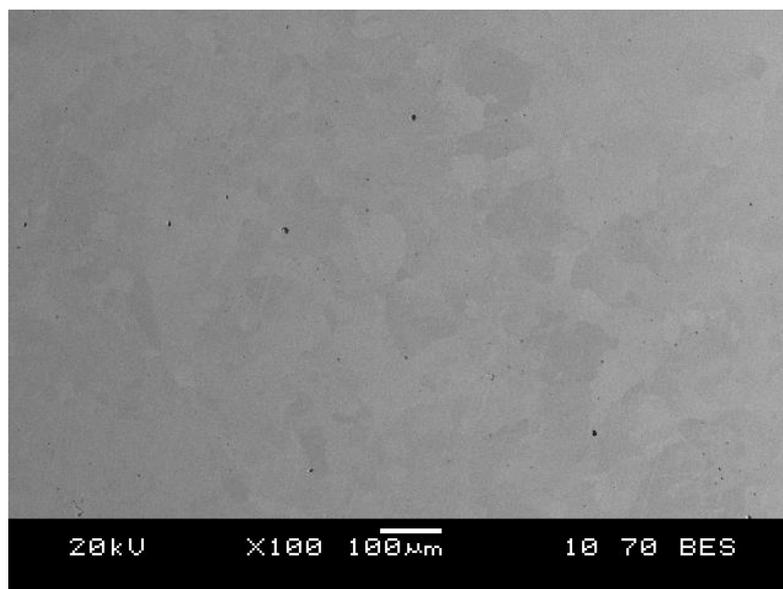


Рис. 5.2. Спектр с поверхности образца 2-102

Содержание элементов в общем спектре с поверхности, % атом.

| Элемент | Si | Cr | Fe | W | Итог |
|----------|------|-------|-------|------|--------|
| Спектр 1 | 0,32 | 13,82 | 85,35 | 0,51 | 100,00 |

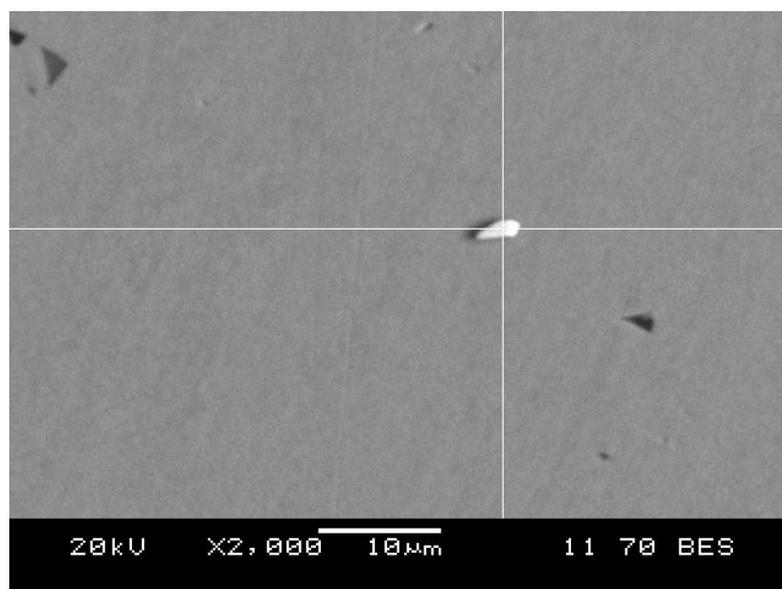


Рис. 5.3. Карбид вольфрама

Содержание элементов в точке с поверхности, % атом.

| Элемент | C | Cr | Fe | W | Итог |
|----------|-------|------|-------|-------|--------|
| Спектр 2 | 10,56 | 5,10 | 36,06 | 48,28 | 100,00 |

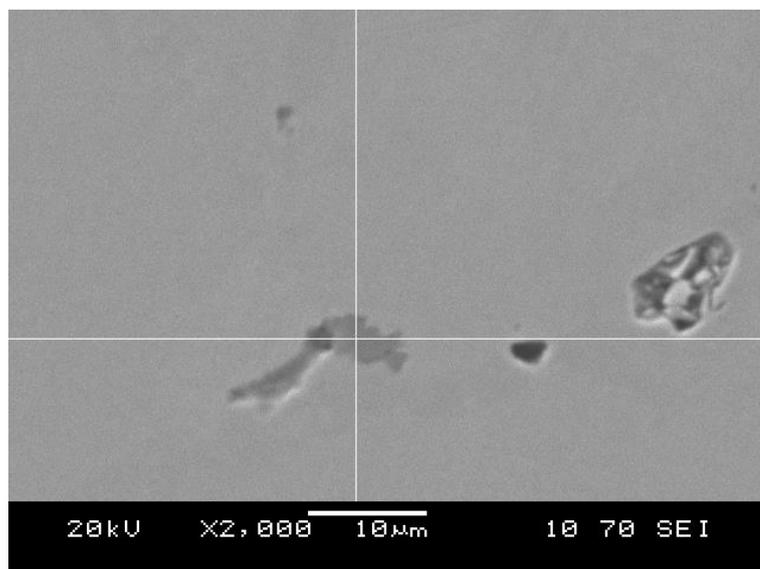


Рис. 5.4. Карбонитрид титана

Содержание элементов в точке с поверхности, % атом.

| Элемент | C | N | Ti | Cr | Fe | Итог |
|----------|------|------|-------|------|-------|--------|
| Спектр 3 | 4,26 | 1,09 | 59,63 | 5,64 | 29,38 | 100,00 |

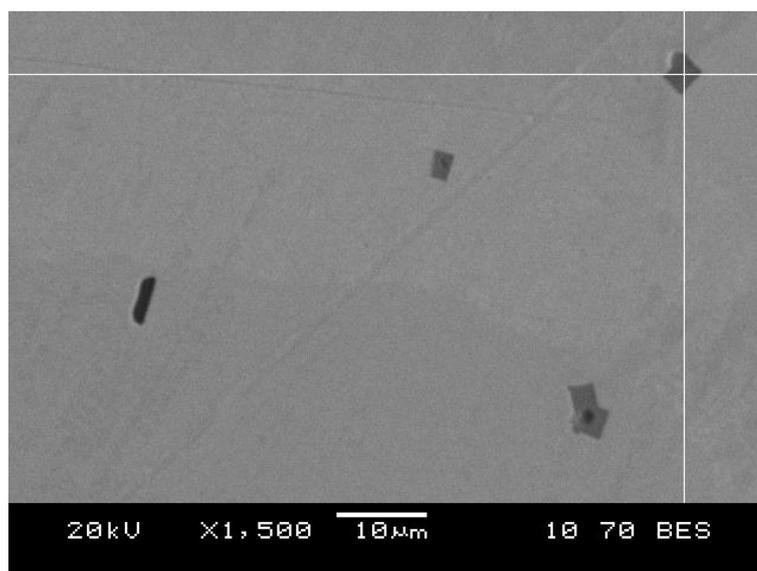


Рис. 5.5. Комплексное включение из нитрида титана и оксида алюминия

Содержание элементов в точке с поверхности, % атом.

| Элемент | O | N | Ti | Al | Cr | Fe | Итог |
|----------|-------|------|------|-------|------|------|--------|
| Спектр 4 | 34,55 | 0,64 | 6,39 | 55,09 | 1,15 | 2,17 | 100,00 |

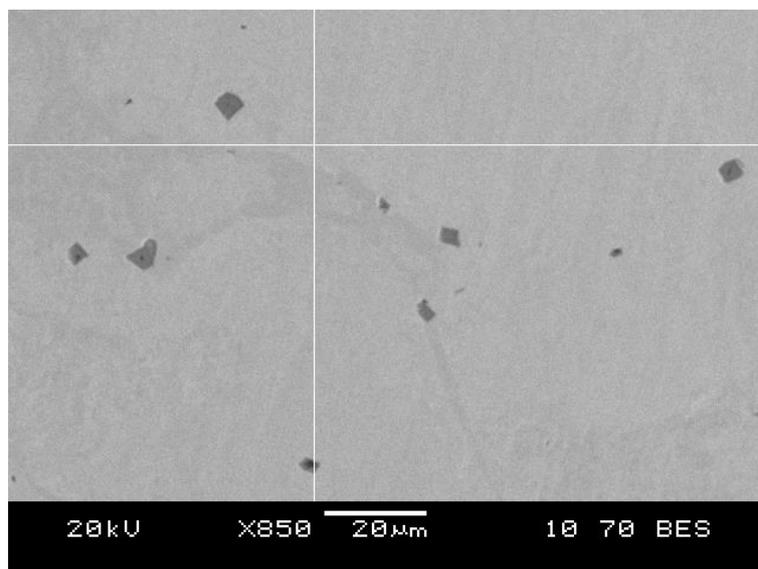


Рис. 5.6. Содержание титана в металлической матрице
Содержание элементов в точке с поверхности, % атом.

| Элемент | Ti | Cr | Fe | Итого |
|----------|------|-------|-------|--------|
| Спектр 5 | 0,39 | 14,08 | 85,53 | 100,00 |

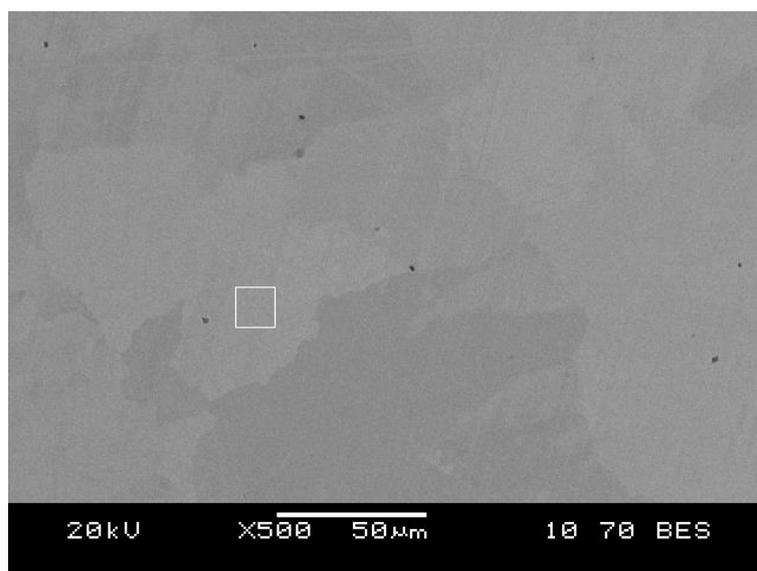


Рис. 5.7. Содержание бора в металлической матрице
Содержание элементов в точке с поверхности, % атом.

| Элемент | B | Si | Cr | Fe | Итого |
|----------|------|------|-------|-------|--------|
| Спектр 6 | 0,72 | 0,47 | 14,00 | 85,48 | 100,00 |

Выводы к главе 5

1. Введение корректирующих добавок в жидкую металлическую ванну при электрошлаковом переплаве может быть осуществлено двумя способами: прямой подачей на шлак и введением с поверхности расходоуемого электрода. Использование специального покрытия на поверхности электрода, содержащего корректирующие добавки, позволяет повысить эффективность усвоения этих добавок. Проценты усвоения корректирующих присадок при введении с поверхности электрода с использованием специального покрытия значительно выше, чем при прямой подаче на шлак.

2. Применение корректирующих добавок позволяет изменять химический состав металлической ванны и формировать отличающийся по химическому составу слой.

3. Результаты экспериментов показывают, что усвоение корректирующих добавок происходит как при прямой подаче на шлак, так и при введении с поверхности электрода. Однако процент усвоения добавок выше при использовании специального покрытия электрода. Проценты усвоения корректирующих присадок при введении с поверхности электрода составляют: для карбида вольфрама – 85 %, для карбида титана – 55,7 %, для карбида бора – 24,6 %.

4. Использование специального покрытия на поверхности электрода, содержащего корректирующие добавки, позволяет повысить эффективность усвоения этих добавок. Это связано с тем, что покрытие обеспечивает непосредственный контакт добавок с каплей электродного металла, минуя взаимодействие с рабочим флюсом. Таким образом, добавки попадают в металлическую ванну в чистом виде, без примесей и взаимодействий, что способствует их лучшему усвоению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сделано теоретическое обоснование и разработаны технические решения получения многослойной заготовки с минимальной протяжённостью переходной зоны между слоями методом электрошлакового переплава. Показана возможность доставки корректирующих материалов в жидкую металлическую ванну, минимизируя контакт с рабочим флюсом и обеспечивая максимальное их усвоение.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Экспериментально подтверждено, что реализация технологии вращения расходуемого 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. Плотность формируемого слитка увеличивается на 2,6 %, размер дендритной ячейки уменьшается на 27 %.

2. Установлено, что перенос места доставки капель из подэлектродной зоны на $1/3$ радиуса в сторону кристаллизатора уменьшает глубину металлической ванны в два раза и обеспечивает плоский фронт кристаллизации.

3. Обоснован технологический подход, позволяющий влиять на формирование фронта кристаллизации жидкой металлической ванны и позволяющий уменьшить 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 минимальным значением переходной зоны между слоями. Выполнены исследования макро-

и микроструктуры, прочностных механических характеристик и усталостные испытания экспериментального многослойного материала.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свойства многослойной стали после термической и комплексной обработки / Д.А. Прокошкин, А.Г. Васильева, В.В. Горюшин и др. // МиТОМ. 1971. – № 6. – С. 29–33.
2. Лозинский, М.Г. Применение трёхслойной стали У7-30У7 для автомобильных рессор / М.Г. Лозинский, Е.И. Натанзон, В.Г. Темяко // МиТОМ. – 1966. – № 5. – С. 27–29.
3. Глухих, Л.П. Особенности структуры двухслойной стали 22К+08Х18Н10Т после термомеханической обработки / Л.П. Глухих, В.И. Козлов // МиТОМ. – 1982. – № 10. – С. 45–47.
4. Кузеев, И.Р. Изменение механических свойств двухслойной стали 16ГС+08Х13 в процессе длительной эксплуатации / И.Р. Кузеев, Г.Е. Закирничный, Л.Ф. Закирова // МиТОМ. – 2009. – № 9. – С. 39–42.
5. Неверов, В.В. Использование технологии наплавки износостойких сплавов короткими участками при упрочнении деталей металлургического оборудования / В.В. Неверов, В.В. Карих // Сварочное производство. – 2005. – № 12. – С. 25–27.
6. Слоистые металлические композиции: учебное пособие / И.Н. Потапов, В.Н. Лебедев, А.Г. Кобелев и др. – М.: Металлургия, 1986. – 216 с.
7. Освоение прокатки фасонного биметаллического профиля для сельскохозяйственного машиностроения / П.С. Плеханов, С.А. Голованенко, В.К. Кобызев и др. // Сталь. – 1965. – № 10. – С. 922–927.
8. Определение величины переходной зоны в электрошлаковом слитке из разнородных металлов / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, А.К. Цыкуленко и др. // Специальная электрометаллургия. – 1973. – № 9. – С. 9–12.
9. Глухих, Л.П. Особенности структуры двухслойной стали 22К + 08Х18Н10Т после термомеханической обработки / Л.П. Глухих, В.И. Козлов //

Металловедение и термическая обработка металлов. – 1982. – № 10. – С. 45–47.

10. Повышение стойкости крупных молотовых штампов, изготовленных из литого металла ЭШП / В.С. Гринюк, В.Ф. Карпов, А.Г. Бойко и др. // Рафинирующие переплавы. – Киев: Наукова Думка. – 1975. – Вып. 2. – 256 с.

11. Сварка материалов давлением. Технологические процессы, строение сварных соединений: учебное пособие / под ред. Руктуева А.А. – Новосибирск: НГТУ, 2022. – 126 с.

12. Двучичанская, Н.Н. Композиционные материалы. Физико-химические свойства: учебное пособие / Н.Н. Двучичанская, Л.Е. Слинько, В. Пясецкий. – М.: МГТУ им. Н.Э Баумана, 2008. – 48 с.

13. Никитина, Л.А. Состояние и перспективы развития производства многослойной и биметаллической металлопродукции / Л.А. Никитина // Metallurg. – 1998. – № 8. – С. 38 – 40.

14. Освоение прокатки фасонного биметаллического профиля для сельскохозяйственного машиностроения / П.С. Плеханов, С.А. Голованенко, В.К. Кобызев и др. // Сталь. – 1965. – № 10. – С. 922–927.

15. Структурные изменения в процессе производства биметаллического проката с защитным жаростойким покрытием / Б.Е. Надворный, В.В. Пашинский, И.А. Амбарян и др. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1988. – № 8. – С. 75–79.

16. Троянский, А.А. Развитие математической модели описания тепловых процессов получения биметаллических отливок ЭШП / А.А. Троянский, А.Ю. Пасечник, С.Н. Ратиев // Вестник Донечкого национального технического университета. – 2021. – № 1 (23). – С. 51–55.

17. Голованенко, С.А. Сварка прокаткой биметаллов / С.А. Голованенко. – М.: Металлургия, 1977. – 158 с.

18. Дунаев, В.В. Особенности технологии производства крупногабаритных плакированных листов и труб большого диаметра из них /

В.В. Дунаев, А.В. Мунтин, М.В. Самохвалов и др. // *Металлург.* – 2022. – № 9. – С. 23–30.

19. Лехов, О.С. Исследование напряжённо-деформированного состояния металла плакирующего слоя из сплавов алюминия при получении трёхслойных биметаллических листов на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // *Производство проката.* – № 12. – 2018 – С. 4–7.

20. Двухслойные вальцы для мукомольной промышленности и технологии их изготовления / Г.С. Мирзоян, Р.Х. Гималетдинов, А.В. Копьёв и др. // *Литейное производство.* – 2007. – № 1. – С. 25–26.

21. Гималетдинов, Р.Х. Особенности производства мельничных валков для пищевой промышленности / Р.Х. Гималетдинов, Л.С. Капустина, А.Г. Мирзоян // *Технология металлов.* – 2004. – № 10. – С. 46–47.

22. Быков, А.А. Развитие производства биметаллов // *Металлург.* – 2009. – № 9. – С. 60–64.

23. Кондратенко, В.М. Особенности производства и свойства проката из литых многослойных композиций / В.М. Кондратенко, В.В. Лейбензон, С.С. Казаков // *Металлург.* – 2002. – № 12. – С. 33–35.

24. Новые технологические процессы в электрометаллургическом производстве стали / В.М. Кондратенко, О.Н. Штехно, В.А. Лейбензон и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2001. – № 2. – С. 24–32.

25. Костин, Н.А. Технологические аспекты повышения стойкости штампового инструмента: монография / Курск: ЗАО «Университетская книга» – 2018. – 287с.

26. Чигарев, В.В. Разработка технологии подготовки поверхности восстанавливаемого изделия под электроконтактное плакирование порошковым электродом / В.В. Чигарев, В.А. Пресняков, Е.В. Кассова // *Захист металургійних машин від поломок: збірник наук. праць.* – 2008. – № 10. – С. 46–51.

27. Наплавка износостойкого слоя на детали почвообрабатывающего инструмента в литейной форме / Ю.В. Гребнев, В.В. Шлепин, Г.Г. Захаров и др. // Литейное производство. – 2000. – № 4. – С. 11–12.

28. Тимошенко, В.П. Повышение ресурса работы долотообразных лемехов совершенствованием процесса наплавки и термообработки / В.П. Тимошенко // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С.155–156.

29. Коррозионно-стойкие биметаллы с прочным сцеплением слоёв для нефтехимической промышленности и других отраслей/ И.Г. Родионова. – М.: Металлургиздат, 2011. – 292 с.

30. Влияние обработки некоторых биметаллических материалов на прочность сцепления // А.Д. Курицына, Н.М. Рудницкий, Ф.В. Королёв и др. // МиТОМ. – 1962. – № 10. – С. 8–11.

31. Оголихин, В.М. Получение композиционных материалов с заданной теплопроводностью сваркой взрывом / В.М. Оголихин, С.Д. Шемелин // Сварочное производство. – 2008. – № 9. – С. 14–17.

32. Оголихин, В.М. Получение композиционных материалов с заданной теплопроводностью сваркой взрывом / В.М. Оголихин, С.Д. Шемелин // Технология машиностроения – 2008. – № 4. – С. 5–8.

33. Исследование влияния хромированного слоя на работоспособность сталеалюминиевого композита / О.В. Строков, В.И. Кузьмин, В.И. Лысак и др. // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: материалы IV Всероссийской конф.: в 4 т. – Волгоград: Темплан, 2006. – Т. 1. – С. 97–98.

34. Радионова, И.Г. Разработка коррозионностойких биметаллических материалов с высокопрочным соединением слоёв путём использования электрошлаковой наплавки: дис. ... док. техн. наук / И.Г. Радионова. – Москва, 2005. –362 с.

35. Павлов, А.А. Технологические факторы формирования структуры и свойств коррозионностойких биметаллов, получаемых методом электрошлаковой наплавки: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Павлов. – Москва, 2005. –155 с.

36. Рыбкин, А.Н. Формирование структуры и свойств коррозионностойкого биметаллического проката, получаемого с использованием метода электрошлаковой наплавки: дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Рыбкин. – Москва, 2004. – 219 с.

37. Зорин, И.В. Исследование процесса электрошлаковой наплавки в секционном кристаллизаторе торцев цилиндрических изделий сплавов на основе Ni_3Al : дис. ... канд. техн. наук / И.В. Зорин. – Волгоград, 2006. – 145 с.

38. Патон, Б.Е. Новый процесс получения биметалла с коррозионностойким плакирующим слоем / Б.Е. Патон, Ю.А. Стеренбоген, Н.А. Мосендз // Сталь. – 1983. – № 7. – С. 16–17.

39. Исследование процесса кристаллизации биметаллических слитков, полученных электрошлаковой отливкой / Е.А. Казачков, С.Л. Макуров, В.Ф. Алакозов и др. // Сталь. – 1984. – № 8. – С. 48–50.

40. Вдовин, К.Н. Электрошлаковый переплав на металлургическом предприятии / К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, Л.Г. Егорова, Н.А. Феоктистов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. – 141 с.

41. Электрошлаковая технология в машиностроении / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, И.Д. Нагаевский и др.; под общ. ред. Б.Е. Патона. – Киев: Техника. – 1984. – 215 с.

42. Теория сварочных процессов (2-е издание) / В.М. Неровный, А.В. Коновалов, Ф.Б. Якушин и др. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – 704 с.

43. Электрошлаковая наплавка изношенных кузнечных штампов / под ред. Н.А. Дмитриева // Технологии. Материалы. Оборудование. Каталог ИЭС им. Е.О. Патона. – Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2005. – С. 9.

44. Михненко, В.И. Получение способом ЭШП МЖ разнородного по длине слитка большого сечения с минимальной переходной зоной / В.И. Махненко, Л.Б. Медовар, С.С. Козлитина и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 2 (107). – С. 3–7.

45. Электрошлаковая сварка и наплавка / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение. – 1990. – 511 с.

46. Медовар, Б.И. Получение биметаллических заготовок методами, основанными на использовании электрошлакового процесса. Сообщение 1 / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, В.И. Кумыш // Проблемы СЭМ. – 1992. – № 4. – С. 28–41.

47. А.с. 129473 СССР. Способ получения многослойного проката / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, А.М. Макарова и др. – Бюл. № 12. – 1960.

48. Ключев, М.М. Металлургия электрошлакового переплава / М.М. Ключев, А.Ф. Каблуковский. – М.: Metallurgy, 1969. – 256 с.

49. Определение величины переходной зоны в электрошлаковом слитке из разнородных металлов / Б.И. Медовар, Л.В. Чекотило, В.Л. Артамонов и др. // Специальная электрометаллургия. – 1970. – № 9. – С. 9–12.

50. Ключев, М.М. Электрошлаковый переплав / М.М. Ключев, С.Е. Волков. – М.: Metallurgy, 1984. – 208 с.

51. Чуманов, И.В. Расчет протяженности переходной зоны биметаллического слитка, полученного методом электрошлакового переплава / И.В. Чуманов, М.А. Порсев // Электрометаллургия. – 2011. – № 11. – С. 35–39.

52. Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходуемого электрода / А.К. Цыкуленко, И.А. Ланцман, Л.Б. Медовар и др. // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2000. – № 3. – С. 16–20.

53. Зайцев, В.А. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока // В. А. Зайцев, Л.Б. Медовар // Современная электрометаллургия. – 2011. – С. 3–7.

54. Цыкуленко, А.К. Электрошлаковые технологии выплавки слитков. Жидкий металл или расходуемый электрод / А.К. Цыкуленко // Рецензии и научные дискуссии. – 2013. – № 2. – С. 55–58.

55. Определение величины переходной зоны в электрошлаковом слитке из разнородных металлов / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, А.К. Цыкуленко и др. // Специальная электрометаллургия. – 1973. – № 9. – С. 9–12.

56. Чуманов, И.В. О возможности получения многослойных слитков электрошлаковым переплавом / И.В. Чуманов, М.А. Порсев // Электрометаллургия. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

57. Медовар, Б.И. Metallургия электрошлакового процесса / Б.И. Медовар, А.К. Цыкуленко, В.Л. Шевцов. – Киев: Наукова думка, 1986. – 246 с.

58. Вачугов, Г.А. Электрошлаковый переплав. Учебное пособие / Г.А. Вачугов, Г.А. Топорищев. ЧПИ: Челябинск, 1981. – 98 с.

59. Патон, Б.Е. Электрошлаковый металл / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар. – Киев: Наукова думка, 1981. – 680 с.

60. Егоров, А.В. Расчёт мощности и параметров электроплавильных печей / М.: Metallургия, 1993. – 320 с.

61. Павлов, А.В. Спецэлектрометаллургия сталей и сплавов: учебное пособие / В.А. Павлов, Е.Ю. Лозовая, А.А. Бабенко // Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2018. – 168 с.

62. А.с. 2472099/22-02 СССР, М. Кл.2 С21С 5/56 Горизонтальная установка для электрошлаковой отливки плакированной заготовки / В.А. Коняев, И.Е. Косматенко, А.Н. Ерогов. – 15.12.1991, Бюл. 46.

63. Авдонин, Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации / Н.А. Авдонин. – Рига: Зинатне, 1980. – 180 с.

64. Жеребцов, С.Н. Особенности тонкой структуры аустенитного металла ЭШП / С.Н. Жеребцов, Г. Радченко // Ползуновский альманах – 2003. – № 7 – С. 136–137.

65. Багмутов, В.П. Математическое моделирование формирования макро- и микропористости стального слитка / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров // Сталь. – 2006. – № 9. – С. 22–27.

66. Paar, A. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting / A. Paar, R. Schneider, P. Zeller, G. Reiter, S. Paul // *Steel Research Int.* – 85. – 2014. – P. 570–578.

67. Протоковиллов, И.В. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП / И.В. Протоковиллов, В.Б. Приходько *Современная электрометаллургия.* – 2014. – № 3. – С. 7–14.

68. Chumanov V.I. Speed control of remelting in the electroslag process by changing the rotation speed consumable electrode / V.I. Chumanov, Chumanov I.V. // *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing.* – 2016. – P. 21–25.

69. Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП / А.А. Троянский, А.Х. Дымнич, Л.Б. Медовар, А.Д. Рябцев // *Современ. электрометаллургия.* – 2005. – № 4. – С. 6–9.

70. Kharicha, A. Review on modeling and simulation of electroslag remelting / A. Kharicha, E. Karimi-Sibaki, M. Wu and ets. // *Steel research.* – 2018. – № 1, – № 89.

71. Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве / В.П. Куделькин, М.М. Ключев, С.И. Филиппов и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 1969. – № 3. – С. 54–59.

72. Simulation of electro-slag remelting process of 120 t large ingot for nuclear power station and its application. / L. Xihai, W. Junqing, J. Weiguo et al. // *China Foundry.* – 2011. – № 4. – P. 413 – 417.

73. Temperature Fields of Large ESR Slab Ingots / B.I. Modovar, V.F. Demchenko, A.G. Bogachenko et al. // *Mechanical Engineering Transactions - Institution of Engineers.* – 1977. – P.153 – 156.

74. Mitchell, A. Thermal characteristics of the electroslag process / A. Mitchell, S. Joshi // *Metallurgical Transactions B.* – 1973, – V. 4, № 3. – P. 631 – 642.

75. Li, B. Current, Magnetic field and joule heating in electro-slag remelting processes / B. Li, F. Wang, F. Tsukihashi // *ISIJ Int.* – 2012, – V. 52, № 7. – P. 1289–1295.

76. Jardy, A. Mathematical modeling of coupled fluid flow and heat transfer phenomena during electroslag remelting of super-alloys / A. Jardy, D. Ablitzer, J.F. Wadier // *Editions de Physique.* – 1986, – P. 285–294.

77. Electro-slag remelting of high-speed steel using a magnetic field / M. Murgaš, A.S. Chaus, A. Pokusa et al. // *ISIJ International.* – 2000. – V. 40, № 10. – P. 980–986.

78. Poole, G. On the Influences of Adjacent Conducting Media and Coil Frequency on the Electromagnetic Field and Flow Characteristics in Solidifying Melts / G. Poole, N. Laurentiu // *Journal for Manufacturing Science and Production.* – 2015. – V. 55, № 1. – P. 13–22.

79. Poole, G.M. Numerical modeling of macro-segregation in binary alloys solidifying in the presence of electromagnetic stirring / G.M. Poole, M. Heyen, L. Nastac et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 2014. – V. 45, №10. – P. 1834–1841.

80. A comprehensive model of the electro-slag remelting process: Description and validation / V. Weber, A. Jardy, B. Dussoubs et al. // *Metallurgical Transactions B.* – 2009. – V. 40, № 3. – P. 271–280.

81. Effect of processing parameters on temperature profiles, fluid flow, and pool shape in the ESR process / V. Srinath, D.K. Melgaard, A.D. Patel et al. // *Liquid Metal Processing and Casting.* – 2005. – V. 18, № 21. – P. 145–154

82. Choudhary, M. Some general characteristics of heat and fluid flow phenomena in electric melting and smelting operations / M. Choudhary, J. Szekely // *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy.* – 1981. – V. 90. – P. 164–173.

83. Choudhary, M. Modelling of fluid flow and hear transfer in industrial-scale ESR system / M. Choudhary, J. Szekely // *Iron Making and Steelmaking.* – 1981. – V. 8, № 5. – P. 225–232.

84. Dilawari, A.H. Calculation of current-voltage relationships and heat-generation patterns in electro-slag refining process / A.H. Dilawari, J. Szekely // *Iron Making and Steelmaking*. – 1977. – V. 4, № 5. – P. 308–312.

85. Kharicha, A. On the importance of electric currents flowing directing into the mould during an ESR process / A. Kharicha, W. Schutzenhofer, A. Ludwig et al. // *Steel Research Int.* – 2008. – V. 79, № 8. – P. 632–637.

86. Бабенко, Э.Г. Исследование управляющего механического воздействия на повышение эффективности / Э.Г. Бабенко, Э.Н. Кузьмичев, М.А. Колесников // *Вестник института тяги и подвижного состава*. – 2012. – № 8. – С. 225–232.

87. Freser, M.B. Mass transfer in the electroslag process. Part 1: Mass transfer model / M.B. Freser, A. Mitchell // *Ironmak and steelmak.* – 1976 – V. 3, № 5. – P. 279–287.

88. Mass transfer model of desulfurization in the electroslag process / H. Dong, J. Hua Zhou, D. Yan-Wu and ets. // *The minerals, metals and Materials Society*. – 2021. – V. 488. – № 6. – P. 1885–1897.

89. Shi, X. Effect of mold rotation on the bifilar electroslag remelting process / X. Shi, L. Chang, J. Wang // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2015. – V. 22, № 10. – P. 1033–1042.

90. Чуманов, И.В. Технология электрошлакового переплава с вращением расходуемого электрода / И.В. Чуманов, В.И. Чуманов // *Металлург*. – 2001. – № 3. – С. 40–41.

91. Pat. (US) № 3867976, Electroflux melting method and apparatus / F. S. Suarez, W.L. Mankins, J.E. Roberts // опубл. 25.02.1975.

92. Pat. (JP) № 52124423 (A), Stirring up method of molten slug in casting of electro slug / S. Minehisa, T. Inui, Y. Shiraki. – опубл. 19.10.1977.

93. А.С. (СССР) № 216.012.448с. Способ перемешивания шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве расходуемого электрода / Э.Г. Бабенко, Э.Н. Кузьмичев, М.А. Колесников. – Оpubл.: Спец. электросталлургия. – 1983. – № 53. – С.19–20.

94. Компан, Я.Ю. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами / Я.Ю. Компан, Э.В. Щербинин // Машиностроение. – 1989. – № 272. – С. 11.

95. Компан, Я.Ю. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов / Я.Ю. Компан, А.Т. Назарчук, И.В. Протокилов // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 4. – С. 3–7.

96. Протокилов, И.В. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей / И.В. Протокилов, В.Б. Порохонько // Современная металлургия. – 2017. – № 3. – С. 9–13.

97. Influences of the transverse static magnetic field on the droplet evolution behaviors during the low frequency electroslag remelting process / H. Wang, Y. Zhong, Q. Li et al. // ISIJ International. – 2017. – V. 57, № 12. – P. 2157–2164.

98. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны / Л.Б. Медовар, А.К. Цыкуленко, А.В. Чернец и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. – 2000. – № 4. – С. 3–7.

99. Чернец, О.В. Нові електрошлакові технології з роз'єднанням плавлення та твердіння металу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2001. – 35 с.

100. Цыкуленко, А.К. Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии / А.К. Цыкуленко, Л.Б. Медовар, А.В. Чернец // Проблемы специальной электрометаллургии. – 2002. – № 2. – С. 9–11.

101. Медовар, Л.Б., Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л.Б. Медовар, В.Я. Саенко, А.П. Стовпченко и др. // Современная электрометаллургия. – 2010. – № 3. – С. 5–10.

102. ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка / Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, А.Н. Головачев, Б.Б. Федоровский // Современная электрометаллургия. – 2013. – № 3. – С. 12–18.

103. Кусков, Ю.М. Электрошлаковый процесс без расходуемого электрода с использованием некомпактного присадочного материала / Ю.М. Кусков // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1992. – № 2. – С. 28–32.

104. Томиленко, С.В. Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны / С.В. Томиленко, Ю.М. Кусков, В.И. Ус // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1993. – № 3. – С. 16–19.

105. Кусков, Ю.М. Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токопроводящем кристаллизаторе / Ю.М. Кусков, В.Г. Соловьев, В.А. Жданов // Автоматическая сварка. – 2017. – № 11. – С. 40–45.

106. Чуманов, В.И. Разработка технологии ЭШП с вращением расходуемого электрода с целью повышения производительности процесса и улучшения качества металла: дис. ... канд. техн. наук / В.И. Чуманов. – Новокузнецк, 1984. – 146 с.

107. Чуманов, И.В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода: дисс... док. тех. наук / И.В. Чуманов. – Челябинск. – 2002. – 345 с.

108. Пятыгин, Д.А. Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе / Д.А. Пятыгин, И.В. Чуманов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. – № 7. – С. 25–26.

109. Huang, X. Role of Electrode Rotation on Improvement of Metal Pool Profile in Electroslag Remelting Process / X. Huang, Y. Duan, Z. Liu and ets// Metals. – 2021. – Vol. 1675. – № 11. –Р. 56–64.

110. Ключев, М.М. Электрошлаковый переплав / М.М. Ключев, С.Е. Волков. – М.: Металлургия. – 1974. – 496 с.

111. Численное исследование динамики удара капли о поверхность жидкости с образованием короны / Т. Джанг, Д. Оуянг, Х.Х. Ли и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 5. – С. 38–47.

112. Марков, Б.Л. Методы продувки мартеновской ванны / Б.Л. Марков. – М.: Metallurgia, 1975. – 280 с.

113. Цаплин, А.И. Теплофизика в металлургии: учебное пособие / А.И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.

114. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

115. А.с. № 2021612155 Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки ЭШП с вращающимся электродом / И.М. Ячиков, И.В. Чуманов, И.В. Портнова, М.А. Матвеева. – заявл. 08.02.2021; опубл. 12.02.2021.

116. Barcellos, V.K. Analysis of metal mould heat transfer coefficient during continuous casting of steel / V.K. Barcellos, C.R.F. Ferreira, C.A. dos Santos and ets. // Institute of Materials, Minerals and Mining Published. – 2010. – V. 37. № 1. – P. 47–56.

117. Пат. 2163269 Российская Федерация, МПК С22В 9/18. Способ получения многослойных слитков электрошлаковым переплавом / И.В. Чуманов. – заявл. 99112625/02, 06.08.1999; опубл. 02.20.2001. – 3 с.

118. Пат. 1420048 Российская Федерация, МПК С22В 9/18. Способ легирования при электрошлаковом переплаве расходуемых электродов / Ю.М. Мухин. – № 2000131736/09; заявл. 4130967, 10.08.1986; опубл. 08.30.1988. – 4 с.

119. Алексеев, И.А. О возможности перевода электрошлаковой печи А - 550 на постоянный ток / И.А. Алексеев, Д.В.Сергеев, И.В. Чуманов // Литейное производство. – 2023. – № 7. – С. 35–38.

120. Чуманов, В.И. Математическая модель переплава вращающегося электрода / В.И. Чуманов, Б.П. Белозёров, И.В. Чуманов // Известия вузов. Черная металлургия. – № 12. – 1991. – С. 74–75.

121. Исследование булата: насущные вопросы. Круглый стол на фестивале День ножа – 2023 (г. Златоуст) / *Металлург.* – 2023. – № 11. – С. 171–174.

122. Шерби, О.Д. Дамасская сталь / О.Д. Шерби, Д. Уодсворт // *В мире науки.* – 1985. – Апрель. С. 74–80.

123. Гуревич, Ю.Г. Булат. Структура, свойства и секреты изготовления: монография / Ю.Г. Гуревич. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2006. – 158 с.

124. Суханов, Д.А. Применение метода спектрального анализа к атрибуции булатных клинков XVII – XIX вв. / Д.А. Суханов, К.С. Хайдаков // *Металлург.* – 2024. – №3 – С. 114–124.

125. Du damasse et des lames de dames / W. Zschokke // *Revue metall (Paris).* – 1924. – Part 1–21. – P. 635–669.

126. Чуманов, В.И. Технология электрошлакового переплава: учебное пособие / В.И. Чуманов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ. – 1999. – 243 с.

127. Interfacial Phenomena in Fe-TiC Systems and the Effect of Cr and Ni / M. Kiviö, L. Holappa, T. Yoshikawa et al. // *High Temperature Material Processes.* – 2012. – V. 31 (4–5). – P. 645–656.

128. Interfacial Phenomena in Fe/Stainless Steel–TiC Systems and the Effect of Mo / M. Kiviö, L. Holappa, T. Yoshikawa et al. // *High Temperature Material Processes.* – 2014. – V. 33 (6). – P. 571–584.

129. Studies on Interfacial Phenomena in Titanium Carbide/Liquid Steel Systems for Development of Functionally Graded Material / M. Kiviö, L. Holappa, S. Louhenkilpi et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science.* – 2016. – V. 47(4). – P. 2114–2122.

130. Модифицирование металла нанопорошковыми материалами для повышения качества слябовой непрерывнолитой заготовки / Е.В. Протопопов, Ю.А. Селезнев, А.Н. Черепанов и др. / *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2013. – № 12. – С. 8–11.

131. Аникеев, А.Н. Моделирование способа повышения износостойкости коронок экскаваторов путем дисперсного упрочнения карбидом титана / А.Н. Аникеев, И.В. Чуманов, И.А. Сементин // Сталь. – 2015. – № 2. – С. 72–74.

132. Fernandes, C.M. Reactive sintering and microstructure development of tungsten carbide-AISI 304 stainless steel cemented carbides / C.M. Fernandes, F.J. Oliveira, A.M.R. Senos // Materials Chemistry and Physics. – 2017. – V. 193. – P. 348–355.

133. Chumanov, I.V. Adding tungsten semicarbide to 08KH18N10T corrosion-resistant steel and its effect on the mechanical properties / I.V. Chumanov, A.N. Anikeev, V.V. Sedukhin // Steel in Translation. – 2022. – Т. 52. – № 2. – P. 129–133.

134. An investigation on the mechanical and tribological properties of alloy A356 on the addition of WC / A.R. Krishna, A. Arun, D. Unnikrishnan et al. // Materials Today: Proceedings. – 2018. – V. 5. – Iss. 5. – P. 2. – P. 12349–12355.

135. Study on the microstructure and properties of WC steel bonded carbide by composite electroslag remelting / C. Zhang, N. Zhang, J. Fang et al. // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 886. – P. 92–96.

136. Distribution of WC Particle in Cast Steel and its Effect on Abrasion Resistance / Y. Han, A.L. Zhang, L. Yang et al. // Materials Science Forum. – 2014. – V. 788. – P. 638–646.

137. Чуманов, И.В. О перспективе введения модифицирующих карбидов WC, W_4C при производстве стали марки 12X18H10T, применяемой в энергетическом машиностроении / И.В. Чуманов, М.А. Матвеева, А.Н. Аникеев // Электротехнология. – 2020. – № 6. – С. 8–13.

138. Невар, Н.Ф. Пути повышения эксплуатационных характеристик литых изделий с использованием карбида бора / Н.Ф. Невар, Д.М. Кукуй // Литьё и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – С. 127–130.

139. Седухин, В.В. Влияние введения дисперсных тугоплавких частиц на механические свойства отливок при различных видах центробежного литья / В.В. Седухин // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2020. – № 19. – С. 134–141.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Акт об использовании результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Златоусть»
А.В. Ваньянев
2024 г.



Акт

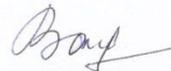
о промышленном внедрении результатов диссертационной работы

ООО «Златоусть» специализируется на производстве холодного украшенного оружия, в традиционном стиле, характерном для Златоустовской оружейной школы. Одно из направлений в работе предприятия – изготовление кованых сварных заготовок с дальнейшим получением из них лезвийной части холодного оружия.

Многослойный металлический композиционный материал, полученный в рамках диссертационной работы Матвеевой Марии Андреевны на тему «Исследование процесса формирования ванны жидкого металла с целью снижения протяженности переходной зоны при производстве многослойных слитков способом электрошлакового переплава» по специальности 2.6.2. «Металлургия чёрных, редких и цветных металлов», использован для изготовления холодного украшенного оружия на производственных мощностях ООО «Златоусть».

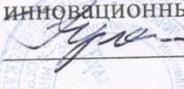
Предприятию предоставлены слиток многослойного материала, температурные режимы деформации, режимы конечной термической обработки. В результате была получена партия клинков с твёрдостью 63 HRC (668 HB).

Директор ООО «Златоусть»

 А.В. Ваньянев

ю/а: 117405, город Москва, Варшавское ш., д.152 к.4, кв.67
сайт: златмастер.рф
тел.: +79518115500

Акт об использовании результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Златоустовский
инновационный центр «БулатградЪ»
 В.Ю. Герасимов

«20» июня 2024 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы
Матвеевой Марии Андреевны на тему «Исследование процесса
формирования ванны жидкого металла с целью снижения протяженности
переходной зоны при производстве многослойных слитков способом
электрошлакового переплава»

Результаты диссертационной работы М.А. Матвеевой, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, внедрены в производство и используются в ООО «Златоустовский инновационный центр «БулатградЪ» при изготовлении многослойных заготовок для производства клинков холодного украшенного оружия.

Предприятию предоставлена поковка опытного многослойного материала 35×35×1200мм, температурные режимы деформации, режимы конечной термической обработки. В результате была получена партия клинков с твёрдостью 62 HRC.

По результатам работы проведена корректировка технологических параметров процессаковки многослойных ножевых заготовок. Использование новых технологических параметров привело к повышению выхода годных заготовок на 11%

Директор ООО «Златоустовский
инновационный центр «БулатградЪ»

 В.Ю. Герасимов

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебном процессе



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
 «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
 (филиал ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте)

456209, Челябинская область, г. Златоуст, ул. Тургенева, 16, тел.(3513) 79-06-90, http://zb.susu.ru, e-mail: zlat-susu@yandex.ru,
 ОКПО 36926196, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/740402001

02.10.2024 № 158
 На № _____

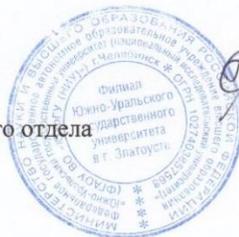
СПРАВКА

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы Матвеевой М.А.
 в учебный процесс

Основные научно-технические результаты, представленные в диссертационной работе Матвеевой Марии Андреевны на тему «Исследование процесса формирования ванны жидкого металла с целью снижения протяженности переходной зоны при производстве многослойных слитков способом электрошлакового переплава» по специальности 2.6.2 «Металлургия чёрных, редких и цветных металлов», внедрены и используются в учебном процессе при подготовке студентов по направлениям 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия».

Директор филиала

Начальник учебного отдела



(Handwritten signature)

А.Н. Дильдин

О.В. Маршалов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2701698

Способ легирования заготовки при помощи плавящегося электрода с покрытием в процессе электрошлакового переплава

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2019118563

Приоритет изобретения 14 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 30 сентября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 14 июня 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



1760



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2021612155**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

| | |
|--|---|
| Номер регистрации (свидетельства): 2021612155 Дата регистрации: 12.02.2021 Номер и дата поступления заявки: 2021611226 08.02.2021 Дата публикации и номер бюллетеня: 12.02.2021 Бюл. № 2 Контактные реквизиты: нет | Автор(ы): Ячиков Игорь Михайлович (RU), Чуманов Илья Валерьевич (RU), Портнова Ирина Васильевна (RU), Матвеева Мария Андреевна (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU) |
|--|---|

Название программы для ЭВМ:
Тепловое состояние кристаллизующейся заготовки в установке ЭШП с вращающимся электродом

Реферат:

Программа предназначена для компьютерного моделирования теплового состояния кристаллизующейся заготовки, формируемой при технологии ЭШП с расходуемым вращающимся электродом. В программе учитывается тепло, поступающее в металлическую ванну с перегретыми каплями металла электрода и передающееся через поверхность ванны вследствие теплообмена со шлаком. Она позволяет задавать геометрические параметры ЭШП, вводить свойства металла и шлака, условия теплообмена и технологические параметры. Результаты расчета тепловых параметров и температурные поля выдаются в виде таблиц, трехмерных поверхностей и диаграмм с нанесением линий уровня. Программа может быть полезна при прогнозировании теплового состояния кристаллизующейся заготовки и производительности ЭШП с вращающимся расходуемым электродом, а также для студентов, аспирантов, инженеров-исследователей и специалистов-проектировщиков. Тип ЭВМ: ПК на базе процессора Intel Pentium 4 и выше; ОС: Windows 9X/Me/NT/2000/XP/Windows 7, 8.

Язык программирования: MATLAB

Объем программы для ЭВМ: 16,525 МБ