

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

На правах рукописи



АЛЕКСЕЕВ Иван Андреевич

**ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ЭШП ВРАЩАЮЩЕГОСЯ
РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА НА ПРОЦЕССЫ ПЛАВЛЕНИЯ,
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ**

2.6.2. – Metallurgy of black, colored and rare metals

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Чуманов Илья Валерьевич

Челябинск 2026 г

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	16
1.1. История возникновения ЭШП. Принцип работы технологии	16
1.2. Технология ЭШП на постоянном токе. Особенности, преимущества и недостатки.....	20
1.3. Компенсирующее воздействие и его виды	27
1.3.1. ЭШП с вращением РЭ	27
1.3.2. Магнитоуправляемый ЭШП	31
1.3.3. Технология ЭШП на токе пониженной частоты	35
1.3.4. Технология импульсного ЭШП	37
1.4. Цифровые двойники процесса ЭШП.....	40
1.5. Рафинирующая способность технологии ЭШП и ее модификаций.....	46
1.5.1. Удаление серы.....	47
1.5.2. Удаление газов	49
1.5.3. Удаление неметаллических включений	53
Выводы по главе 1	55
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	58
2.1. Формулировка задачи.....	58
2.2. Математический аппарат численной модели	62
2.3. Граничные и начальные условия численной модели.....	67
2.4. Результаты численного моделирования	73
2.5. Вывод эмпирической формулы допустимой скорости вращения расходуемого электрода	79
Выводы по главе 2	84
ГЛАВА 3. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ	86
3.1. Подготовка материальной базы	86
3.2. Ход и режимы ведения плавки.....	91
3.3. Подготовка образцов	92

Выводы по главе 3	94
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА	95
4.1. Спектральный анализ химического состава и концентрации вредных примесей в полученных слитках	95
4.2. Анализ концентрации газов в металле	103
4.3. Оптический анализ микроструктуры металла на предмет наличия неметаллических включений в полученных слитках	109
4.4. Валидация результатов численной модели.....	118
Выводы по главе 4	121
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ.....	123
5.1. Определение показателей удельной производительности и энергоемкости ЭШП.....	123
Выводы по главе 5	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	130
СПИСОК ТЕРМИНОВ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ В	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

ЭШП является технологией вторичного переплава, которая широко используется при изготовлении широкой номенклатуры металлов и сплавов электрометаллургической отрасли. Данной технологии могут подвергаться все наименования сталей с целью улучшения физико-механических свойств и химической однородности и чистоты получаемого слитка. Однако, особую роль и необходимое присутствие данной технологии требуют технологические цепочки изготовления сталей и сплавов ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования надежности и долговременного гарантированного их обеспечения. Неизменным основным потребителем сталей и сплавов, произведенных как с помощью технологии ЭШП, так и с применением иных родственных ей технологий СЭМ, является военный ВПК. Цели в виде сохранения и постоянного совершенствования обороноспособности государств, в частности Российской Федерации, требуют решения стратегических задач освоения и защиты новых территорий на земле, в воде, воздухе и космосе. Выполнение этих задач невозможно без своевременного и экономически эффективного создания техники и инфраструктуры, способной работать в суровых условиях, и которые используют новейшие перспективные материалы [1].

Технология ЭШП имеет широкую вариативность в конструктивном исполнении и тонкостях принципа работы печей, что обеспечивает ей наибольшую производственную гибкость. ЭШП также является самой экономически выгодной технологией СЭМ по показателю удельной энергоемкости [2], однако она не может использоваться повсеместно для вторичного переплава абсолютно всех узкоспециализированных сталей и сплавов с целью достижения наивысших показателей чистоты и однородности химического состава металлических слитков. В результате чего ЭШП занимает технологическую нишу по удалению кислорода и серы из состава металла с обеспечением изотропности физико-механических

свойств слитка, что достигается капельным переносом металла из тела РЭ в формируемый слиток. В настоящее время именно обеспечение изотропности физико-механических свойств и гомогенность химического состава по всему телу слитка в совокупности с измельченной структурой металла являются основными причинами сохранения ЭШП в технологической цепочке получения качественных сталей и сплавов. Однако вопрос об относительно высокой энергоемкости ЭШП все еще остается открытым и требующим решения.

Экономическую эффективность обеспечивает относительная простота конструкции печи. Развитыми способами увеличения производительности являются увеличение удельной массы переплавляемого металла и снижения потерь энергии на переменном токе, к которым относятся наращивание длины слитка и применение бифилярной схемы подведения тока. Практическая реализация первого решения заключается в использовании Т-образного кристаллизатора с вариациями в виде подвижной стенки кристаллизатора или поддона. Второе решение реализуется за счет использования многоэлектродной компоновки печи ЭШП с числом РЭ кратным числу фаз переменного тока для обеспечения взаимного самоподавления его реактивной составляющей. В части улучшения показателей качества слитка по вредным примесям, неметаллическим включениям и газам может применяться вакуумирование печной атмосферы, аналогично процессу ВДП и иным технологиям СЭМ. Таким образом, поиск и разработка энергоэффективных и производительных технологий для получения сталей и сплавов с улучшенными эксплуатационными свойствами без потери качества и излишних материальных затрат обуславливают актуальность данного исследования.

Печь ЭШП является резистивным электрическим сталеплавильным агрегатом, который использует излучаемую теплоту преобразования электрического тока для плавления металла. В силу физической природы теплового излучения, оно является всенаправленным. Количество теплоты, выделяемой электрическим током по закону Джоуля-Ленца в шлаковой ванне, которое используется непосредственно для плавления электрода и не рассеивается в окружающую среду и отводится

составными элементами печи, куда входят РЭ, ШВ, гарнисаж, МВ, ВК, формируемый металлический слиток, находится в пределах 33 % [3]. Отсутствие принципиальной возможности управления локализацией теплового центра снижает тепловую мощность от работы электрического тока значительно снижает КПД печи ЭШП. Сюда же входит и влияние рода используемого тока. Наиболее распространенные печи ЭШП на переменном токе более выгодны с точки зрения минимизации количества и разнообразия используемого электротехнического оборудования в основной токоведущей цепи, но наличие реактивной составляющей тока повышает минимальный допустимый предел силы тока, необходимой для ведения плавки. Постоянный ток с точки зрения энергоэффективности более предпочтителен ввиду того факта, что вся выделяемая им мощность является только активной и полностью переходит в выделяемое тепло при прохождении сквозь проводник с высоким электрическим сопротивлением. Однако необходимость применения высокомошных устройств выпрямления тока и потери, возникающие при прохождении тока через них, могут стать значительным препятствием в наращивании технико-экономических показателей печи ЭШП. Отбросив расходы на дооснащение печей ЭШП и предельную минимизацию потерь на преобразование тока за счет использования современных тиристорных управляемых выпрямителей можно достичь около 20 % приращения КПД плавки на агрегатах, использующих постоянный ток [4].

Несмотря на существующие явные преимущества использования постоянного тока взамен переменного на печах ЭШП эта технология не получила широкого распространения. Технология ЭШП с применением постоянного тока обладает существенными недостатками, которые могут поставить под вопрос целесообразность модернизации для достижения прогнозируемых технико-экономических и технологических преимуществ в виде возможности переплава габаритных слитков, снижения потребления электрического тока, ускорения скорости плавки, изменения рафинирующей способности при поляризации тока. Наиболее критичным из них является неконтролируемое искажение формы фронта

кристаллизации в результате блуждания ее формы с течением времени на всем протяжении плавки с последующим возникновением дефекта послойной кристаллизации слитка. Управление формой фронта кристаллизации становится невозможно без накладывания внешнего возмущающего воздействия на основные компоненты печи ЭШП, непосредственно задействованные в переплаве и контактирующие с подэлектродной зоной печи. Неконтролируемое постоянное изменение формы фронта кристаллизации с течением времени по ходу плавки вызывается нарушением равномерности течения конвективных потоков и, соответственно, расположения тепловых центров. Причиной этому является возникновение эффекта магнитного дутья, которое возникает лишь в случаях отсутствия симметричности токоподвода. Данная конструктивная особенность повсеместно присутствует во всех печах ЭШП как результат упрощения их конструкции для их более технологичного строительства, обслуживания и использования. Дефект послойной кристаллизации слитка полностью нарушает изотропность его физико-механических свойств вследствие отсутствия направленного и равномерного роста дендритов в ходе его кристаллизации. Существуют экспериментальные технологии ЭШП, предусматривающие внедрение конструктивных мер в печи ЭШП, базирующиеся на явлениях электромагнитной и гравитационной природы, для подавления негативных факторов печей на постоянном токе.

Степень разработанности темы исследования

Идея о применении постоянного тока при ЭШП появилась с момента создания данной технологии на переменном токе, однако использование существующих на тот период времени методов исследования не позволяло изучить способы подавления магнитного дутья без значительных финансовых и временных потерь. В результате чего ЭШП занял свою нишу, как наиболее производительная технология СЭМ на переменном токе, предназначенная для выплавки номенклатуры наиболее распространенных качественных сталей и сплавов. Исторически был выбран подход к повышению КПД процесса ЭШП с

применением многоэлектродной бифилярной схемы с применением нескольких кристаллизаторов на одной печи.

В период распространения алгоритмов реализации методов математической физики на ЭВМ, направленных на исследование процессов в сплошных средах, началось плавное исследование не только природы постоянного тока при ЭШП, но и протекания иных явлений в печах СЭМ, что осуществлялось одновременно с проведением экспериментов на физических моделях. К настоящему времени отечественные и зарубежные исследователи представили цифровые двойники технологий СЭМ, в частности ЭШП, которые демонстрируют возможность использования данного подхода при исследовании электротермических процессов. Были опубликованы работы, сообщающие результаты разработки цифровых двойников ЭШП, моделирующих использование различных внешних воздействий для повышения КПД плавки, рафинирующих свойств в виде вибрации тела РЭ, вращения тела РЭ, применения внешнего постоянного магнитного поля в том числе и с модуляцией тока, а также рода и полярности используемого тока. Результаты данных исследований подвергались проверке экспериментальными плавками, показывающими степень сходимости их результатов с цифровыми двойниками.

Исследование проводилось с учетом достижений С.А. Истомина, В.И. Потапова, Г.А. Вачугова, Г.А. Хасина, Ю.М. Миронова, О.А. Есина, Б.И. Медовара, А. Митчела, А. Дилавари, П. Келькара, А. Харичи, А. Паара.

Цель работы

Исследование влияния постоянного тока прямой и обратной полярностей при ЭШП со стационарным и вращающимся телом расходуемого электрода на изменение характера формирования слитка, его химического состава и рафинирующую способность переплава, а также на технико-экономические показатели производительности ЭШП на постоянном токе в сравнении с технологией ЭШП на переменном токе. Для достижения поставленной цели был выполнен следующие задачи:

1. Разработать модель прогнозирования формирования фронта кристаллизации при ЭШП на постоянном токе с использованием вращения тела расходуемого электрода.

2. Провести модернизацию печи ЭШП А-550 в части дооснащения основной токоведущей цепи выпрямителем тока и установки привода вращения тела расходуемого электрода с регулировкой его скорости.

3. Провести серию экспериментальных плавов на модернизированной полупромышленной печи А-550 с вариациями токовых режимов.

4. Провести анализ макроструктуры слитков на предмет изменения формы фронта кристаллизации по ходу ЭШП при разных токовых режимах.

5. Провести анализ полученных слитков на предмет получения сведений об изменении химического состава и предельной концентрации ВП, НВ и газов.

Научная новизна и теоретическая значимость

1. Впервые разработана комплексная математическая модель, позволяющая получить расчетные сведения о гидродинамической, тепловой и электромагнитной картинах в объеме шлаковой и металлической ванн. Комплексная математическая модель учитывает совмещение электротермических, электромагнитных, тепловых, и гравитационных явлений, протекающих внутри рабочей зоны печи ЭШП.

2. Впервые установлено наличие влияния полностью выпрямленного тока при ЭШП стали на изменение концентрации легирующих компонентов в виде марганца, кремния и хрома на примере стали марки 30ХМА. При ЭШП на постоянном токе прямой полярности концентрации марганца, кремния и хрома снижаются на 22 %, 13 % и 8 % соответственно относительно ЭШП на переменном токе. При ЭШП на постоянном токе обратной полярности концентрации марганца, кремния и хрома снижаются на 14 %, 23 % и 2 % соответственно.

3. Впервые установлено наличие влияния полностью выпрямленного тока при ЭШП стали на изменение концентрации вредных примесей в виде серы, неметаллических включений в виде оксидов, нитридов, сульфидов и газов в виде кислорода и азота на примере стали марки 30ХМА. При ЭШП на постоянном токе

прямой полярности концентрация серы увеличивается на 38 % относительно ЭШП на переменном токе, а концентрации сульфидов, нитридов и кислорода снижаются на 48 %, 2 % и 15 % соответственно относительно ЭШП на переменном токе. Концентрация оксидов и их плотность одновременно увеличиваются в 3 раза относительно ЭШП на переменном токе. Концентрация азота не изменяется. При ЭШП на постоянном токе обратной полярности концентрации серы, сульфидов, нитридов, кислорода и азота снижаются на 25 %, 68 %, 74 %, 55 % и 23 % соответственно относительно ЭШП на переменном токе. Концентрация оксидов и их плотность одновременно увеличиваются на 3 % относительно ЭШП на переменном токе.

4. Впервые установлено наличие влияния полностью выпрямленного тока при ЭШП стали на принципиальную возможность изменения концентрации водорода на примере стали марки 30ХМА. При ЭШП на постоянном токе прямой полярности концентрация водорода снижается на 12 % относительно ЭШП на переменном токе. При ЭШП на постоянном токе обратной полярности концентрация водорода увеличивается на 29 % относительно ЭШП на переменном токе.

5. Впервые установлено наличие влияние полностью выпрямленного тока при ЭШП стали на изменение удельных технико-экономических показателей энергоэффективности и скорости переплава на примере стали марки 30ХМА. При ЭШП на постоянном токе прямой полярности энергопотребление печи ЭШП снижается на 17 % относительно ЭШП на переменном токе, а скорость переплава увеличивается на 16 % относительно ЭШП на переменном токе. При ЭШП на постоянном токе обратной полярности энергопотребление печи ЭШП увеличивается на 9 % относительно ЭШП на переменном токе, а скорость переплава снижается на 21 % относительно ЭШП на переменном токе.

Практическая значимость работы

1. Разработана компьютерная реализация (цифровой двойник) комплексной математической модели в виде численной модели для прогнозирования процессов и явлений внутри рабочей зоны печи ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ.

2. Предложены две технологические вариации использования ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ в зависимости от используемой полярности тока, нацеленные на получение возможности снижения концентрации водорода в металле в совокупности повышением КПД плавки при токе прямой полярности или интенсификацию снижения концентрации кислорода, азота и серы в виде ВП, НВ и газов при токе обратной полярности.

3. Получены свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ, предназначенных для моделирования взаимодействия компонентов несжимаемого многокомпонентного потока, а также с учетом электротермического и электромагнитного явлений (Свидетельство № 2021611791 от 05.02.2021, Свидетельство № 2021618185 от 14.05.2021, Свидетельство № 2023619309 от 26.04.2023).

4. 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.

Диссертационное исследование было поддержано грантами РНФ № 22-29-20049 с темой «Зависимость фронта кристаллизации металла от электротермических процессов» и Фонда содействия инновациям «Умник» 17190ГУ/2021 с темой «Разработка программного обеспечения для численного моделирования электротермических процессов в текучих сплошных средах».

Методология и методы исследования

Математическая модель ЭШП разрабатывалась с учетом динамического принципа явлений, т.е. применялось построение систем дифференциальных уравнений в частных производных. Применялись принципы построения математического аппарата, заложенные в вычислительной гидродинамике. Для

реализации динамического прогнозирования процессов и явлений использовалось компьютерное моделирование с помощью программных систем инженерного анализа, работающих на основе метода конечных объемов, или т.н. CFD-моделирование. В качестве систем инженерного анализа использовался коммерческий комплекс Ansys Fluent и свободно распространяемый программный фреймворк для инженерного анализа OpenFOAM. Для осуществления эксперимента и проведения анализа полученных образцов слитков использовалась материальная база кафедры «Техника и технологии производства материалов» филиала ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ) в г. Златоусте. Эксперимент проводился на автоматизированной полупромышленной печи ЭШП А-550. Спектральный анализ образцов слитков проводился на эмиссионном спектрометре МСА II. Анализ концентрации газов в металле проводился на газоанализаторах Метавак-АК (азот и кислород) и Метавак-В (водород). Анализ микроструктуры слитков осуществлялся на металлографическом микроскопе C.Zeiss Observer D1.m, оснащённом программным комплексом Thixomet PRO. Подготовка микрошлифов осуществлялась на комплексе Buehler. Оценка структуры образцов производилась в соответствии с ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры», ГОСТ 5640-2020 «Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского».

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты численного моделирования, включающие числовые поля распределения плотности тока, направленности силы Ампера и температур металлической и шлаковых ванн, полученные при итерационном вычислении разработанного комплексного цифрового двойника процесса ЭШП на полупромышленной установке А-550.
2. Сведения об изменении формы фронта кристаллизации при использовании ЭШП на постоянном токе с вращением тела расходующего электрода.
3. Результаты спектрального и газового анализа полученных слитков ЭШП на предмет соответствия концентрации химических элементов требованиям к

прокату стали марки 30ХМА; на предмет предельной концентрации газов в металле: азота, кислорода и водорода.

4. Результаты оптического анализа микроструктуры поверхностей слитков на предмет предельной концентрации НВ в металле: сульфидов, оксидов и нитридов.

5. Результаты сравнительного анализа энергоэффективности работы печи ЭШП А-550 в вариациях переплава на переменном токе, постоянном токе прямой и обратной полярности, в том числе и при наличии вращения тела расходуемого электрода.

Степень достоверности

Достоверность полученных эмпирических результатов обеспечивается благодаря организации условий чистоты эксперимента с учетом использования современной промышленной автоматики и контрольно-измерительной аппаратуры во время плавов, а также современных промышленных измерительных установок спектрометрии и газоанализаторов.

Достоверность прогнозируемых результатов обеспечивается использованием валидной численной моделью рабочей зоны полупромышленной печи ЭШП А-550 с учетом геометрических размеров и особенностей моделируемых процессов с достаточным приближением и введением допустимых упрощений. Математический аппарат и программная реализация численной модели верифицированы для моделирования протекающих процессов печи ЭШП. Результаты моделирования коррелируют с результатами экспериментальных плавов и не противоречат по своему характеру результатам иных исследований по данному направлению, рассмотренных в данной работе.

Апробация результатов

Материалы диссертационного исследования были доложены, обсуждены и апробированы на следующих конференциях: XVI Международный Конгресс сталеплавильщиков и производителей металла (г. Екатеринбург, 2021 г.); VIII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2021» (г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «УрФУ (НИУ)», 2021 г.);

Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии" RusMetalCon-2021» (г. Челябинск, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» 2021 г.); Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии" RusMetalCon-2022» (г. Сочи, 2022 г.); Импортозамещение в металлургии и металлургическом машиностроении (г. Москва, НИТУ МИСиС, 2022 г.); XVII Международный Конгресс сталеплавильщиков и производителей металла «От руды до стали» - ISCON – 2023 (г. Магнитогорск, 2023 г.); Международная конференция «Научно-практическая школа молодых металлургов» – 2023 (г. Выкса, НИТУ МИСиС, 2023 г.); XIX Международная научная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Аша, 2024 г.); II Национальная научно-практическая конференция «Технологии металлургии машиностроения и материалобработки» (г. Магнитогорск, 2024 г.); III Национальная научно-практическая конференция «Технологии металлургии машиностроения и материалобработки» (г. Магнитогорск, 2025 г.); Национальный Форум с международным участием Металлургия 360: диалог профессионалов отрасли «Сквозная цепочка: от руды до высокотехнологичного изделия – этапы формирования затрат и качества» (г. Челябинск, 2026 г.).

Личный вклад автора

Формулировка целей и задач исследования, проведение инженерного анализа с использованием программных конечно-элементных CFD-систем; разработка комплексного математического аппарата, алгоритма вычисления и программного кода в рамках метода конечных объемов; проектирование трехмерной геометрии расчетной области, наиболее близко соответствующей компонентам экспериментальной установки; определение физических свойств материалов и веществ модели, граничных условий; анализ полученных результатов, представленных в виде числовых полей, с последующей их визуализацией; разработка принципиальной и кинематической схем действующей полупромышленной печи ЭШП А-550; разработка программного препроцессора и

графического интерфейса программы для моделирования электротермических процессов, организация серии экспериментов в части подбора переплавляемых материалов, их типоразмеров, удельной массы, технологических режимов ведения плавов, периодического снятия показаний времени, температуры, энергопотребления; анализ и валидация результатов численного моделирования в сравнении с данными экспериментальных плавов; аналитика результатов химических анализов образцов слитков, подготовка рукописей публикаций, фиксирующих текущие результаты работы; участие в конференциях; подготовка рукописи диссертации.

Публикации

В ходе выполнения диссертационного исследования осуществлено 14 публикаций, в числе которых 4 размещены в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в наукометрической базе Scopus в оригинальном или переводном виде, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, изложена на 160 страницах машинописного текста, включающего 36 рисунков, 10 таблиц, списка использованных источников из 110 наименований отечественных и зарубежных публикаций, 3 приложений.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. История возникновения ЭШП. Принцип работы технологии

ЭШП, как и все технологии СЭМ базируются на применении электричества в качестве основного источника энергии. Впервые же электричество в качестве источника получения теплоты в металлургии было использовано французским инженером Полем Эру в 1899 году при создании первого опытно-промышленного образца ДСП. С того момента электрический ток стал повсеместно внедряться не только в металлургии, но и в других отраслях промышленности в связи мировыми планами о повсеместной индустриализации производства. По мере того, как электричество становилось более доступным и дешевым, плавильные агрегаты, работающие на электрическом токе, получали все большее и большее распространение. Их основным достоинством была возможность выплавлять большие объемы металла в единицу времени и за единицу всех потраченных материальных ресурсов. Также благодаря применению электрического тока, ДСП были более технологичные в части организации процесса выплавки металла по сравнению с применяемыми регенеративными печами. Отчасти это послужило тому факту, что к настоящему времени электросталеплавильное производство практически полностью заменило собой технологию выплавки стали в регенеративных печах, а на новейших производствах они не возводятся уже значительное время. Без возможности использования электрической энергии в качестве источника теплоты в плавильном агрегате было бы принципиально невозможно создание такой отрасли, как СЭМ в том виде, в котором она известна нам сейчас.

Кроме технологий выплавки металла с помощью электроэнергии также появились и технологии электродуговой сварки отдельных изделий в единую готовую конструкцию. Сварка изделий между собой стала технологическим преимуществом при создании массивных и фасонных конструкций, однако существовала значительная проблема в обеспечении качества сварного шва. Ввиду того, что во время электрической сварки металла сварочный шов насыщался газами

из окружающей атмосферы, преимущественно кислородом и водородом, закристаллизовавшийся сварочный шов становился хрупким из-за множественных дефектов в виде трещин и свищей. В связи с этим при электрической сварке стали применять защиту в виде флюсов и активной продувки инертными газами по избежание попадания газов в жидкий металл. Для обеспечения сварки ответственных изделий с габаритными контактными поверхностями к сварочным швам представлялись значительные требования к качеству, физико-механические свойства которых не должны были уступать качеству свариваемых между собой изделий. Решением этого стало создание технологии ЭШС, в которой применялось активное охлаждение свариваемой зоны водоохлаждаемыми кристаллизаторами, для интенсификации процесса и обеспечения направленной кристаллизации металла. По мере дальнейшего развития ЭШС в начале 50-х годов XX века было предложено использовать ее принцип для получения цельных высококачественных металлических слитков, что породило технологию ЭШП. Первые экспериментальные слитки по данной технологии были получены уже в 1953 году в институте электрической сварки им. Е.О. Патона АН СССР [5, 6].

Технология ЭШП – технология вторичного переплава сталей и сплавов, предназначенная для получения качественных по структуре и обладающих низкой концентрацией ВП и газов слитков. Источником теплоты, необходимой для переплава металла, выступает шлак, наводимый над получаемым металлическим слитком. Выработка резистивной теплоты шлаком, именуемой также Джоулевым теплом, осуществляется исключительно при прохождении сквозь него электрического тока. Способность шлака к выделению теплоты обусловлена его свойствами электропроводимости. При прохождении через шлак электрического тока значительной величины порядка сотен и тысяч Ампер осуществляется выработка теплоты, как результат повышенного удельного сопротивления шлака относительно переплавляемого металла. Плавление металла РЭ путем капельного переноса осуществляется лишь в тот промежуток времени, пока температура ШВ в подэлектродной зоне будет превышать температуру его плавления. Само же

плавление металла РЭ осуществляется путем капельного переноса металла сквозь ШВ в МВ под действием силы тяжести. Печь ЭШП работает в токовом режиме, располагающемся между отсутствием протекания электрического тока сквозь шлак и коротким замыканием между токоведущими частями в зоне плавки. Движение электрического тока отсутствует из-за значительного удельного сопротивления шлака и низкой разницы потенциалов между РЭ порядка единиц и десятков вольт, и жидким металлом получаемого слитка, или медным поддоном ВК в случае использования твердого старта печи. Короткое замыкание основных токоведущих частей возникает в случае снижения удельного электрического сопротивления на пути движения электрического тока, вызванного возникновением так называемой перемычки между ними в результате возникновения струйного переноса металла. Иными же случаями возникновения короткого замыкания является нарушение технологических условий плавки, заключающихся в превышении допустимого напряжения на токоведущих частях в плавильной зоне или при их значительном геометрическом отклонении взаимного расположения. Данные технологические нарушения могут возникнуть как на этапе подготовки к плавке, так и в ходе ее осуществления. Возникновение случаев короткого замыкания в установившемся режиме плавки печи ЭШП не допускается, так как приводит к разрушению элементов основной токоведущей цепи, не входящих в контакт с плавильной зоной. Плавильной зоной является ШВ и ближайшие окрестности вокруг нее, в которые входят МВ, фронт кристаллизации слитка, торцевая часть РЭ и атмосфера над ШВ. Основными токоведущими частями, контактирующими с плавильной зоной, являются РЭ, стенка ВК, МВ, получаемый слиток и водоохлаждаемый поддон. Комбинация токоведущих частей, непосредственно взаимодействующих с плавильной зоной, меняется по ходу осуществления плавки [5, 6].

Технология ЭШП чаще всего характеризуется как наиболее простая в конструктивном исполнении ввиду малого количества составных элементов печи и отсутствия необходимости создания специальных условий в виде вакуумирования, чем также определяется ее технологичность. Отсутствие

возможности контроля печной атмосферы и открытость содержимого ВК в ходе всей плавки дает возможность модернизации и автоматизации технологии в широком диапазоне. Первостепенно печи ЭШП подразделяются по роду тока, используемого в основной токоведущей цепи, на использующие переменный и постоянный ток соответственно. Наибольшую распространенность на металлургических производствах получило исполнение печей, работающих на переменном токе ввиду ее значительной простоты при внедрении на металлургическом производстве и получении металлических слитков удовлетворительного качества с точки зрения изотропности физико-механических свойств и гомогенности химического состава. Расплатой за это следует повышенные затраты на электроэнергию, при которых, однако, ЭШП на переменном токе все равно остается наиболее энергоэффективной технологией с низкими материальными затратами относительно других технологий СЭМ.

По виду источника выделения теплоты печи ЭШП являются резистивными в отличие от других технологий СЭМ. Наиболее близким противопоставлением является печь ВДП, которая является электродуговой, а природа ее источника имеет более точеный, локализованный и более энергоемкий тепловой центр, что позволяет использовать ее для переплава тугоплавких сплавов, например, титана или вольфрама. Резистивный характер источника тепла в ЭШП, которым является ШВ, обеспечивает более низкое удельное тепловое воздействие, как на РЭ, так и на МВ, потому как выделяемое тепло неизбежно используется на поддержание ШВ жидкого состояния. Использование резистивного объемного источника теплоты обеспечивает не только более равномерное распределение теплоты по своему внутреннему объему, но также и обеспечивает возможность осуществлять рафинирование проходящего сквозь ШВ жидкого металла в виде капель. Рафинирующий процесс осуществляется на всем протяжении контракта жидкого металла, находящегося в составе жидкой металлической пленки на торце РЭ, металлической капли и МВ.

При выплавке полых и массивных слитков применяют бифилярную технологию ЭШП, характеризующуюся применением двух и более РЭ взамен монофилярной, использующей один РЭ. Использование бифилярной схемы в совокупности с трехфазным переменным током позволяет осуществлять совместное или циклически попеременное задействование РЭ, в том числе с организацией токоведущей цепи, замыкаемой на одном из РЭ взамен ВК и поддона. Существуют также вариации конструкций печей ЭШП, похожих на печи электронно-лучевого переплава и плазменно-дугового переплава, в которых РЭ располагается горизонтально к оси ВК или под некоторым углом, а замыкание осуществляется либо на такой же РЭ, располагаемый напротив первого, либо на графитовый не расходуемый электрод. Зачастую в качестве модификации печи ЭШП, она может оснащаться дополнительными устройствами для осуществления жидкого старта печи, внедрения легирующих компонентов, дополнительного флюса, виброгенераторами, магнитными катушками, прошивающими дорнами, приводами вертикальной подачи и вращения РЭ, ВК с поддоном. При переплаве слитков с большим соотношением их длины к диаметру возможно использование подвижных разъемных ВК или подвижного поддона. Современная компоновка печей ЭШП, предназначенных для выплавки массивных слитков, предполагает использование минимум двух радиально расположенных ВК вокруг вращающейся станины с токопроводом, позволяющей вести работу в монофилярном и бифилярном режимах.

В рамках данного диссертационного исследования речь будет идти о применении монофилярной технологии ЭШП с РЭ на постоянном токе с единственным стационарным ВК и поддоном с несимметричным электроподводом.

1.2. Технология ЭШП на постоянном токе. Особенности, преимущества и недостатки.

Применение постоянного тока в СЭМ чаще всего ассоциируется с технологией ВДП, по причинам технической реализации и относительной

распространенности в производственных циклах металлургических производств. ЭШП получил наибольшее распространение и развитие в исполнении на переменном токе. Этому способствовали множественные факторы, прежде всего технико-экономического характера, связанные с простотой, дешевизной строительства печей, так и качественных показателей слитков по их структуре и химическому составу. Среди положительных сторон ЭШП относительно других технологий СЭМ можно выделить:

1. Наличие осевой и радиально-осевой бездефектной структурой металла высокой плотности. Данное явление обеспечивается прежде всего формой фронта кристаллизации и невысокой скоростью плавки в сочетании с быстрой скоростью кристаллизации. Использование активного водяного охлаждения ВК, выполненных из сплавов технической меди по типу М1, М2 и других, позволяет эффективно отводить тепло из тела формируемого слитка, МВ и ШВ. Осевая направленность обеспечивается конструктивными особенностями формы ВК и взаимного расположения РЭ и ВК. Равномерное и медленное формирование слитка препятствует образованию скоплений НВ и газов у фронта кристаллизации, которые либо остаются в ШВ либо выводятся конвективными потоками в МВ к границе раздела фаз «шлак-металл». Данное преимущество не касается технологии ЭШП на постоянном токе ввиду значительного проявления эффекта магнитного дутья на каплеперенос металла в ШВ.

2. Снижение концентрации НВ оксидов и чистого кислорода до двух-трех раз. Это обусловлено: во-первых, защитой поверхности жидкого металла от контакта с атмосферой; во-вторых, применением флюсов высокой основности; в-третьих, ионизированным состоянием жидкого шлака, которое в сочетании с электрическим током эффективно разбивает и вытягивает молекулы оксидов из жидкого металла, прежде всего расположенного в металлической пленке на торце РЭ и падающих каплях металла. Стоит заметить, что наиболее эффективно это происходит при использовании переменного тока, нежели постоянного обратной

полярности. Применение постоянного тока прямой полярности резко ухудшает раскислительную способность шлака.

Технология ЭШП на постоянном токе включает в себя вышеперечисленные достоинства за некоторыми исключениями. Основным замыслом ее воплощения было совмещение сильных сторон ЭШП и ВДП, однако вместе с ними возникли и существенные недостатки, которые свели на нет все преимущества и создали значительное препятствие к повсеместному замещению ЭШП на переменном токе с целью усовершенствования технико-экономических показателей данной технологии при выплавке широкой номенклатуры качественных сталей. Технология ЭШП должна была пополниться следующими положительными качествами от применения постоянного тока:

1. Электромагнитное перемешивание ШВ. Данное явление является следствием проявления пинч-эффекта. Перемешивание ШВ вызывается активным воздействием магнитной составляющей тока, вектор силы которой всегда направлен перпендикулярно к потоку заряженных частиц, тем самым удерживая его в устойчивом положении. Магнитная составляющая тока вызывает завихрения внутри объема ШВ, заставляя ее вращаться вокруг потока заряженных частиц. Иное название этого явления – пондеромоторная сила. Пондеромоторная сила способствует эффективному перемешиванию ШВ, повышая равномерность распределения тепла в ней, а также активность рафинирующей способности шлака [7].

2. Управление локализацией теплового центра. В силу своей технологической особенности печь ЭШП является резистивной печью, в которой отсутствует строгое выделение источника теплоты, как в печах ВДП. При использовании поляризации тока можно управлять расположением теплового центра в объеме ШВ, что непосредственно влияет как на тепловую картину самой ШВ, так и на форму остальных изменяющихся компонентов, как фронт кристаллизации, МВ и торец РЭ. В совокупности с воздействием конвективных потоков внутри ШВ можно добиться либо более однородного распределения

теплоты по всему ее объему, либо сфокусировать в одном из возможных расположений. При использовании внешних воздействий на ШВ и МВ возможность управления локализацией теплового центра имеет еще больший эффект на распределение теплоты, тем самым регулируя КПД печи, скорость плавки и качество структуры получаемых слитков.

3. Селективное рафинирование. Номенклатура качественных сталей имеет значительное количество марок, которые явно или неявно группируются по сферам применения, эксплуатационным и монтажным условиям. Естественно, что для одних марок условия переплава в печи ЭШП будут наиболее подходящими, а для других недостаточными или избыточными ввиду предъявляемого к ним химического состава до и после переплава. Несомненно, что ЭШП на переменном токе эффективно осуществляет процессы десульфуризации и раскисления, но не осуществляется реакция выведения водорода. Использование поляризации тока может сфокусировать процессы выведения ВП из металла с определенным зарядом иона и учетом использования подходящих шлаков. Кроме того, постоянный ток является причиной возникновения электролизных реакций, что должно стимулировать выведение ВП из металла, находящихся в форме положительных и отрицательных ионов. Таким образом, возможно осуществления реакции выведения водорода, пребывающего в металле в форме H^+ при его осаждении на электроде с отрицательной полярностью.

4. Ликвидация реактивного сопротивления. В печах ЭШП на постоянном токе РЭ представляет собой активное сопротивление, которое постепенно уменьшается по мере сокращения длины РЭ. РЭ печей ЭШП на переменном токе благодаря отсутствию выпрямляющих устройств представляет собой сочетание активного и реактивного сопротивления. Реактивное сопротивление кроме снижения КПД тока создает эффект наличия индуктивности в токоведущей цепи. Кроме дополнительного нагрева проводников в результате выделения теплоты от смены направления магнитного поля вокруг токоведущих частей печи, индуктивное реактивное сопротивление повышает порог прохождения тока через

ШВ, препятствуя более легкому зажиганию дуги и требуя большего количества силы тока в проводнике. Таким образом, кроме снижения потерь на выработку нагрева токоведущих частей, повышается КПД работы печи ЭШП при использовании постоянного тока. Также значительно упрощается механизм компенсации сокращения длины РЭ по мере плавки во избежание снижения тепловой эффективности ШВ.

5. Переоборудование простаивающего оборудования. Современное развитие металлургического производства позволяет осуществлять процессы рафинирования и внепечной обработки стали в агрегатах типа ковш-печь, что исключает из производственной цепочки вторичный переплав, в частности, в печах ВДП. Учитывая факт о необходимости внедрения дорогостоящего выпрямительного оборудования при переводе печей ЭШП с переменного на постоянный ток, переоборудование печей ВДП в печи ЭШП может стать рациональной мерой с точки зрения внедрения новой технологии СЭМ и продления срока службы существующих производственных фондов металлургических предприятий. Кроме того, технология ЭШП на постоянном токе может получить наибольший экономический эффект именно в случае модернизации действующих или законсервированных печей ЭШП и ВДП, причем при осуществлении технического перевооружения печей ВДП в печи ЭШП на постоянном токе возникает дополнительное технологическое преимущество, а именно вакуумирование атмосферы печи над ШВ. Данная особенность должна способствовать усилению раскисления переплавляемых стальных слитков и препятствовать насыщению металла и шлака кислородом воздуха под действием парциального давления над шлаком [8].

К недостаткам предлагаемой технологии относятся следующие ее особенности:

1. Значительные материальные затраты на переоборудование действующих печей ЭШП, работающих на переменном токе, для работы на постоянном токе.

2. Отсутствие изотропности физико-механических свойств получаемого слитка. Причиной этого является нарушение осесимметричной формы фронта кристаллизации, вызванным непрогнозируемым неравномерным распределением конвективных потоков и смещенным расположением теплового центра. Данное явление является результатом проявления магнитного дутья. Магнитное дутье является обратной стороной проявления пинч-эффекта и проявляется в случаях несоосного расположения электродов относительно друг друга, организации несимметричного токоподвода к ним, а также несимметричного расположения ферромагнитных масс вокруг межэлектродного промежутка и разделения основного потока заряженных частиц на его составляющие. Дополнительным критерием возникновения этого эффекта является форма используемых электродов по типу «штырь-трубка». В печах ЭШП на постоянном токе с РЭ трубкой выступает электрически не заизолированный ВК от токопроводящего поддона. Эффект магнитного дутья является красугольным при осуществлении переплава в печах ЭШП на постоянном токе с РЭ, без ликвидации которого получения качественных слитков не представляется возможным.

3. Ухудшение рафинирующих свойств переплава по абсолютному значению.

4. Невозможность эффективного использования литых РЭ, полученных на машинах непрерывного литья заготовок и литье в изложницу.

Определение в качестве настоящей причины нарушения изотропности физико-механических свойств, выражающееся деформацией структуры слитка как следствия возникновения эффекта блуждающей ванны, явления магнитного дутья до конца не определено. Явление магнитного дутья строго задокументировано в литературе о сварочных процессах, в которых применяется электродуговая сварка. Данное явление непосредственно присутствует в технологии ВДП, однако стабилизацией потока заряженных частиц исследователи данной технологии мало заинтересованы, так как оно не вызывает значительного эффекта на каплеперенос металла из тела РЭ, а смещение направления горения дуги компенсируется сокращением высоты межэлектродного промежутка. При применении постоянного

тока в ДСП фокусировка дуги становится затруднительной по мере отдаления электрода в своде печи от подового электрода вследствие неравномерности распределения ферромагнитных масс во внутреннем пространстве ДСП. Эти выводы приведены в результате некоторых исследований профессора М.Ю. Миронова [9-11]

По своей природе электрическая дуга представляет собой движение заряженных частиц,двигающихся в среде ионизированного газа, который поддерживает и обуславливает процесс горения дуги. С точки зрения физики, для процесса возникновения и поддержания горения электрической дуги необходимо обеспечить достаточное количество свободных заряженных частиц в окрестности ожидаемого протекания электрического тока, формируя тем самым среду для его существования в виде т.н. газового проводника-электролита. Согласно ионной теории шлаков, предложенной О.А. Есиным и В.А. Ванюковым [12], шлаки в жидком агрегатном состоянии представляют собой ионные растворы или электролиты. Флюсы, чаще всего используемые при ЭШП и маркируемые индексом типа АНФ, в расплавленном состоянии представляют собой токопроводящие растворы системы с основой дифторида кальция CaF_2 и различными примесями оксидов металлов кремния, кальция, натрия, алюминия, магния, циркония, бария и других. Здесь компонент CaF_2 всегда находится большей концентрации, так как ионы фтора являются наиболее активными переносчиками заряженных частиц. Таким образом, если жидкий шлак и газовая атмосфера дуги являются по своей природе если и не одинаковыми, то достаточно близкими в части осуществления электропроводности, можно выставить предположение о том, что для описания поведения заряженных частиц в ШВ при ЭШП на постоянном токе можно руководствоваться сведениями о поведении заряженных частиц в электрической дуге при плавке в ДСП и ВДП. Природа поведения электрической дуги будет близка поведению потока заряженных частиц в ШВ при ЭШП на постоянном токе. Данное уточнение является крайне важным при осуществлении математического моделирования и компьютерной симуляции электротермических

процессов при ЭШП на постоянном токе с целью прогнозирования и определения точного и достоверного компенсирующего воздействия для управления ходом плавки.

1.3. Компенсирующее воздействие и его виды

Очевидно, что реализация технологии на ЭШП с РЭ на постоянном токе в монофилярном исполнении в ее изначальном виде является неоправданной как в части материальных затрат, так и в части технологических особенностей, негативно влияющих на качество получаемых слитков. Предлагаемую технологию ЭШП необходимо модернизировать с целью обеспечения таких условий плавки, при которых произведена достаточная компенсация или полная ликвидация наиболее влиятельных негативных явлений, к которым относится, прежде всего, магнитное дутье. Кроме подавления негативных явлений путем наложения внешних воздействий необходимо использовать их как можно эффективнее для наиболее полного раскрытия потенциала технологии ЭШП на постоянном токе в части их производительности и контроля за ходом плавки. Иными словами, предлагаемая технология ЭШП должна обеспечивать предельно возможный динамический контроль над качеством получаемых слитков в любой момент времени и предоставлять возможность управлять скоростью плавки с учетом рационального использования электрической энергии. Как уже было определено ранее основными направлениями создания печей ЭШП на постоянном токе является модернизация либо существующих печей ЭШП на переменном токе, либо печей ВДП. Поэтому все далее рассмотренные и предложенные способы устранения магнитного дутья исходят согласно первоначальному типу модернизируемой печи.

1.3.1. ЭШП с вращением РЭ

Технологию ЭШП с вращением РЭ можно отнести к роду имеющих контактное воздействие на ШВ путем прямого физического воздействия, возникающего между телом РЭ и ШВ. Существует несколько вариаций вращения РЭ в зависимости от выбранной оси вращения. Здесь же речь идет только о

компоновке с вращением РЭ вокруг своей оси и расположенного коаксиально с ВК и поддоном. Воздействие РЭ на ШВ оказывается путем контактного взаимодействия благодаря межфазному трению на границе раздела фаз «шлак-металл» и внутрифазному молекулярному трению, передающему движение от границы раздела внутрь объема жидкого шлака. Идея о применении вращающегося РЭ при ЭШП возникла в стенах кафедры общей металлургии кафедры филиала Челябинского политехнического института в г. Златоусте. Идейным представителем является профессор Вачугов Г.А., являющийся одним из авторов соответствующего патента [13] о способе ЭШП. Вращение РЭ создает поле гравитационных сил, состоящее из центробежной и центростремительной сил. Учитывая тот факт, что вращение осуществляется непосредственно телом РЭ, то прямое воздействие от действия центробежной и центростремительных сил испытывает первоочередно жидкий металл, находящийся на торце РЭ в виде вязкой пленки. Центробежная сила, возникающая при вращении РЭ, стягивает жидкий металл в пленке с центральной части торца РЭ на его периферию. В зависимости от интенсивности вращения изменяется и величина центробежной силы, действующей на пленку жидкого металла, в пределах от едва заметного сокращения длины мениска на торце РЭ вплоть до его полного исчезновения и придания плоской формы торцу РЭ. При наложении поля гравитационных сил на жидкий металл пленки на торце РЭ добавляется новая сила, смещающая направление вектора суперпозиции сил преимущественно в направлении своего основного действия перпендикулярно оси РЭ. Таким образом, силе поверхностного натяжения металла и молекулярному внутрифазному трению, действующим внутри пленки жидкого металла противодействует дополнительно новая центробежная сила. В результате увеличения абсолютного значения вектора суперпозиции силы происходит более частый отрыв измельченных капель металла с торца РЭ. Траектория движения оторвавшихся капель имеет форму близкую к форме спирали благодаря их постоянно затухающим ускорению и скорости движения. Тот факт, что капля металла с торца РЭ обладает наиболее раскаленным

металлом, изменяет картину теплового распределения внутри ШВ и МВ, а также изменяет форму фронта кристаллизации с выгнутого мениска на более пологую в продольном сечении слитка. Вращение тела РЭ вызывает вращение объема ШВ путем фрикционного воздействия, вследствие чего изменяется направленность конвективных потоков ШВ на противоположную, возникающей при стационарном РЭ. Потоки по тороидальной траектории на периферии начинают спускаться вдоль стенки ВК, двигаться вдоль поверхности МВ, и подниматься к торцу РЭ. Эффект «разбрызгивания» капель металла по периферии ШВ с дальнейшим их падением в объем МВ провоцирует изменение пути движения электрического тока и повышение его плотности, вызывая формирование новых тепловых очагов. Предполагается, что при использовании прямой полярности тока и вращения РЭ возможно достигнуть такого теплового распределения в теле ШВ, которое позволит наиболее рационально и оптимально распределить теплоту с сохранением плоской формы фронта кристаллизации, малой глубины МВ и плоской формы торца РЭ без возникновения негативных последствий в виде занесения жидкого шлака внутрь МВ и наоборот, вскрытия ШВ на границе «шлак-атмосфера» и образования вогнутой формы торца РЭ.

Согласно работам исследователей [14, 15] величины накладываемой центробежной силы достаточно для подавления магнитной составляющей электромагнитной силы, возникающей в результате эффекта магнитного дутья. Дополнительно к этому величин центробежной силы достаточно для того, чтобы управлять процессом каплепереноса металла в необходимом диапазоне, организуя падение капель металла в строго отведенный круговой участок на поверхности МВ. Авторы работы [15] утверждают, что вращение РЭ при ЭШП на постоянном токе увеличивает скорость плавки со снижением энергопотребления без возникновения структурных дефектов, влекущих за собой ухудшение физико-механических свойств слитка. Дополнительно указывается на выравнивание плотности металла полученного слитка после его выплавки, что является признаком изотропности физико-механических свойств слитка. Исследования проводились на сталях двух

марок: 30X13 и 30ХМА и использованием постоянного и переменного токов. Окончательным выводом стало утверждение, что слитки, получаемые на ЭШП с вращением РЭ, не уступают по свойствам прочности, твердости и вязкости в холодном состоянии деформированному металлу, причем увеличение скорости вращения способствует улучшению этих свойств. Исследования проводились для слитков диаметром 90 мм и скоростях вращения РЭ не более 120 об/мин. В работе [16] проводилось исследование влияния вращения на химическую однородность, рафинирующую способность и угар легирующих компонентов. Разница в химическом составе устанавливалась путем сравнения концентраций химических компонентов в РЭ до плавки и полученном слитке. Наиболее сильно подверженными к воздействию вращения РЭ оказались марганец и кремний, концентрация которых явно сокращалась по мере интенсификации вращения. Причем наибольшее влияние оказал сам факт вращения РЭ нежели его интенсификация. Авторы предполагают, что возможной причиной этого является увеличение реакционной поверхности и длительность пребывания капель металла в ШВ. Значительной десульфурации не произошло, что оправдывается ее изначальным низким содержанием в РЭ, химическим составом флюса АНФ-6 и отсутствием использования специализированных рафинирующих технологий в этом исследовании. Анализа на предмет изменения раскислительной способности переплава не проводилось. Авторами замечено, что, несмотря на интенсификацию скорости переплава, не было замечено никаких макродефектов слитка, плотность и равномерность распределения однородной структуры была выше, повышена химическая однородность компонентов в теле полученных слитков сталей марок 30ХМА и 30X13.

Исследователям удалось определить строгие фиксированные значения вращения РЭ при определенных величинах потребляемого тока, напряжения и геометрических размеров слитков, была выведена эмпирическая форма для расчета скорости вращения РЭ для гарантированного подавления эффекта магнитного дутья. Однако, количество работ по использованию вращения РЭ в качестве

регулятора интенсивности теплового распределения ШВ при ЭШП на постоянном токе можно посчитать недостаточным по ряду причин. Если осуществлять вращение РЭ в скоростных пределах лежащих от момента полного подавления действия магнитной составляющей электромагнитной силы до момента проявления одного из вышеупомянутых дефектов ШВ, МВ и РЭ, то можно достигнуть значений КПД печи предельно возможного уровня для каждого типоразмера ВК и РЭ, что являет собой наличие полного динамического контроля над плавкой в печи ЭШП на постоянном токе, отображаемого в конкретных значениях тока, напряжения, скорости вращения и геометрических размерах РЭ и получаемого слитка. Динамический контроль над ходом плавки, учитывающий проявление любого возмущающего воздействия и его изменение, является крайне важным и перспективным, особенно при переплаве РЭ с переменным геометрическим размером и химическим составом в фасонные и полые слитки. Технология монофилярного ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ представляется эффективной технологией с точки зрения повышения продуктивности и энергоэффективности переплава с контролем за изотропностью физико-механических свойств и химической однородности получаемого слитка, однако факт реализации возможности вращения РЭ накладывает значительные ограничения на эксплуатацию подобных печей ЭШП. Здесь возникают ограничения по массо-габаритным параметрам РЭ и эксплуатационным ограничениям, вызванным необходимостью применения скользящих изнашивающихся токосъемников, изготавливаемых для каждого типоразмера РЭ индивидуально. Данные особенности печей ЭШП делают технологию с вращением РЭ довольно узкоспециализированной, в поле действия которой подпадают только РЭ с малой массой, которая, предположительно, не должна превышать пяти тонн. [17, 18]

1.3.2. Магнитоуправляемый ЭШП

Технология с наложением внешнего магнитного воздействия является одним из вариантов физически бесконтактного компенсационного воздействия на эффект

магнитного дутья. Принцип его реализации похож на конструктивные особенности индукционных печей, однако здесь применяется постоянный ток в контуре катушки. В зависимости от расположения витков катушки относительно ВК, их числа и чередования полярностей между ними внутри ВК наводится магнитное поле с соответствующим вектором напряженности.

В работе [19] авторы изучают влияние продольного коаксиального постоянного магнитного поля, накладываемого на РЭ и ШВ при ЭШП на переменном токе. Работа демонстрирует результаты применения физического холодного моделирования с веществами-заменителями настоящих расплавов. Электрод выполнен из сплава Вуда, а ШВ представлена раствором дихлорида цинка $ZnCl_2$. Выявлено наглядное воздействие постоянного магнитного поля на процесс каплеобразования и каплепереноса металла. Несмотря на то, что применяется переменный ток видно, что эффект магнитного дутья проявляется в периодическом формировании капель вне центра торца РЭ. Данный факт авторы объясняют слабым контролем расположения РЭ и частичным выпрямлением тока в используемом перегретом растворе $ZnCl_2$. Авторы заключают, что наложение продольного коаксиального постоянного магнитного поля изменяет направленность конвективных потоков с тороидального на поперечное, осуществляя тем самым вращение вокруг оси ВК. Дополнительно к этому наблюдается ускорение каплепереноса металла с торца РЭ и измельчение капель. Каплеобразование металла локализуется в центре торца РЭ, а каплеперенос становится более линейным и устойчивым относительно оси ВК как в случае с подавленным воздействием магнитного дутья. Авторы утверждают, что данный эффект является следствием возникновения поперечного движения конвективного потока, который образует воронку в подэлектродной зоне. Приграничные слои жидкого металла РЭ и ШВ взаимодействуют друг с другом и под действием молекулярного межфазного трения ШВ придает ускорение жидкому металлу, затягивая его за собой и придавая ему центростремительное и центробежное ускорения. Наблюдается эффект вытягивания капель металла РЭ с помощью ШВ,

представленный в виде силы, направленной вдоль оси РЭ, воздействие которой прибавляется к силе тяжести, действующей на формируемую каплю металла. Это способствует более раннему преодолению силы поверхностного натяжения металла, что влечет за собой измельчение капель в процессе каплеобразования и интенсификацию каплепереноса металла РЭ. Средние показатели изменения частоты каплеобразования увеличились на 20 %, средняя масса капли уменьшилась на 10 %, скорость плавления электрода увеличилась на 10 %.

В работе [20] представлены сведения о применении наложения внешнего магнитного поля импульсного характера. Испытательная установка имеет ту же конструкцию, что и в [19]. В результате проделанной работы было заключено, что с помощью наложения внешнего магнитного поля с учетом его модуляции и модуляции используемого тока в основной цепи можно добиться полного контроля над процессами каплеобразования и каплепереноса металла РЭ, тем самым обеспечить достаточную прогнозируемость процесса и результатов плавки в печах ЭШП в широком диапазоне технологических параметров. Наглядно продемонстрировано, что при различных параметрах модуляции напряженности накладываемого внешнего магнитного поля и тока основной цепи можно добиться как предельной стабилизации хода плавки в сочетании с ее предельной энергоэффективностью, так и создать деструктивные условия плавки путем создания конвективных потоков ШВ чрезмерной интенсивности. Таким образом можно достичь как параметров линейной вертикальной стабилизации каплепереноса металла РЭ, так и принудительных их выброс на периферию подэлектродной зоны. Отличительным фактором здесь является то, что периферийный разброс капель металла обусловлен лишь для массивных капель, в то время как мелкие капли сохраняют свое преимущественно вертикальное прямолинейное движение.

В работе [21] показаны результаты натурного эксперимента на действующей экспериментальной монофилярной печи ЭШП, оборудованной катушкой вокруг ВК, при переплаве титановых РЭ. Конструкция печи позволяет осуществлять

переплав РЭ с использованием электрического тока постоянного и переменного родов, а также накладывать постоянное или пульсирующее внешнее магнитное поле на весь объем ВК. Переплав осуществлялся при параметрах основной токоведущей цепи: напряжение 25-40 В, ток 2-10 кА, индуктивность постоянного внешнего магнитного поля 0,05-0,25 Тл. Переплав осуществлялся и использованием ВК с диаметрами в диапазоне от 80 до 160 мм. Интервал пульсации переменного магнитного поля находился в диапазоне от 0,3 до 20 с. При использовании переменного тока промышленной частоты и переменного магнитного поля с частотой 50 Гц наблюдались колебания в объеме МВ, которые провоцировали резкое ухудшение структуры слитка, которое выражалось в искажении ее радиальной соосности при анализе макроструктуры слитка. Исследователи сделали вывод, что наложение поперечно направленного магнитного поля вызывает искажение радиальной симметрии формы фронта кристаллизации и не способствует выплавке качественных слитков. Наилучший результат был обнаружен при наложении коаксиального переменного магнитного поля. Было замечено, что подобный способ выплавки подавляет любое возмущающее воздействие магнитной составляющей электромагнитной силы, а также способствует снижению потребления энергии при переплаве, измельчению капель при каплеобразовании металла на торце РЭ и интенсификации его каплепереноса. Установлено, что при увеличении частоты пульсации внешнего магнитного поля сокращается потребление тока вследствие изменения формы поверхности раздела фаз «шлак-атмосфера» и уменьшения глубины погружения РЭ в ШВ. Пульсация магнитного поля непосредственно влияет на пульсацию тока, заставляя его колебаться и стимулируя большую степень контроля над процессом кристаллизации слитка. Беспрерывная пульсация внешнего магнитного поля ведет к ухудшению поверхности получаемого слитка. Использование продолжительных интервалов пульсации с чередованием продолжительными паузами работы магнитного поля вызывает появление кольцевых перетяжек на поверхности слитка. Наилучший результат поверхности был получен при использовании предельной

индуктивности магнитного поля с интервалами 1 с – 10 с пульсации и паузы соответственно. Гомогенизация макроструктуры слитка достигается при использовании предельной индуктивности магнитного поля: структура слитка обладает преимущественно однонаправленными осесимметричными мелкими зернами дендритов, что авторы связывают с подавлением колебания переменного тока импульсами магнитного поля и интенсификацией теплоотвода на границе ликвидус-солидус. Однако данный результат плохо поддается масштабированию и при увеличении диаметра слитка свыше 150 мм наблюдается снижение гомогенизации структуры слитка ввиду снижения удельной плотности тока в подэлектродной зоне. В связи с этим требуется увеличение удельной мощности как в основном токоведущем контуре, так и в катушках, для чего предлагается использовать подключение высокоемких конденсаторов в основной контур и контур катушки [22]. Использование высокоемких конденсаторов проявило себя в качестве варианта получения более массивных титановых слитков с удовлетворительной гомогенностью структуры, однако наружная поверхность слитка сильно искажена до состояния, аналогичной гофрированной поверхности, как следствие периодических сильных всплесков энергии и непродолжительных пауз на время подзарядки конденсаторов.

1.3.3. Технология ЭШП на токе пониженной частоты

Применение тока пониженной частоты можно расценивать как способ компенсации негативных явлений, возникающих при использовании постоянного тока. Дополнительно к этому, переоборудование печей переменного тока на ток пониженной частоты проще и дешевле по сравнению с модернизацией для работы на постоянном токе. Однако, данная особенность технологии не является преимуществом при модернизации установок, работающих на постоянном токе, как, например, печей ВДП.

В работе [23] представлены сведения о применении технологии ЭШП на токе пониженной частоты. Авторы описывают результаты применения данной технологии при выплавке стали марки 10Х9МФБ-Ш. Частота тока в основной цепи

составляла 2 Гц. Авторы утверждают, что при использовании тока пониженной частоты улучшается качество структуры получаемого слитка в части образования сонаправленных ветвей дендритов и измельчения балла зерна. Объясняется данный факт тем, что при использовании низкочастотного тока в пределах от 0,01 Гц до 10 Гц форма фронта кристаллизации значительно изменяется, становясь более полой, а глубина МВ сокращается. Предполагается, что улучшение гомогенности структуры получаемого слитка связано с изменением длины и формы зоны, в которой температура металла находится в диапазоне «ликвидус-солидус». Снижение скорости плавки также влияет и на концентрацию ВП в теле слитка. Из-за сокращения размеров самих дендритов и расстояния между их осями, наблюдается общее суммарное сокращение как дефектов слитка, так и ВП, которые их вызывают. Однако, несмотря на это, при использовании низкой частоты тока растет доля измельченных ВП, соразмерных с промежутками между ветвями дендритов.

Использование данной технологии ЭШП предполагается эффективным при получении полых толстостенных слитков, особенно при модификации с иными вариациями ЭШП, например, магнитоуправляемым ЭШП. Если использовать наложение внешнего продольного соосного магнитного поля на ШВ, то можно добиться условий, при которых будет осуществляться разбрызгивание капель металла по периферии ШВ. Авторы [24] утверждают, что при использовании низкочастотного ЭШП можно осуществлять наложение переменного магнитного поля напряженностью в интервале от 2000 до 14000 А/м с частотой 50 Гц. Наложение внешнего магнитного поля осуществляется точно на зону присутствия ШВ и МВ после их окончательного формирования при старте плавки. Подаваемая мощность тока регулируется прямопропорционально диаметру переплавляемого слитка и эмпирическому коэффициенту удельной мощности. Предполагается, что создаваемое вращение ШВ имеет горизонтальную направленность. Активное перемешивание ШВ измельчает капли металла на торце РЭ, и эффективно рассеивает теплоту в ее объеме. Следствием этого является

сокращение глубины МВ. Однако вопрос о захватывании частиц шлака вглубь МВ остается неясен, потому как несмотря на суммарное падение ВП в формируемом слитке, их удельная мелкодисперсная концентрация увеличивается.

1.3.4. Технология импульсного ЭШП

Улучшить качество получаемого слитка можно за счет учащенного каплепереноса металла, сопровождающимся измельчением капель. Данный факт дополнительно увеличивает рафинирующие свойства шлака за счет снижения объема капли. В работе [25] рассмотрен способ применения импульсного ЭШП и его влияние на процесс каплеобразования металла. Исследователи преследовали целью создать такие условия работы печи ЭШП, при которых каплеперенос металла с торца РЭ осуществляется более интенсивно, чем при традиционном ЭШП. В данном исследовании применяется печь ЭШП, работающая на переменном токе с РЭ по монофилярной схеме. Управляющая часть используемой печи была значительно усложнена за счет введения множества электронных компонентов в АСУ печью, что характерно для импульсной технологии. Согласно физике процесса каплепереноса металла из РЭ в МВ формирование капли осуществляется в тонком слое на оплавленной торце РЭ. Потенциальная капля металла формируется вследствие натекания жидкого металла на вершину РЭ по его поверхности и удерживается силами поверхностного натяжения. До тех пор, пока совокупность гравитационных и электромагнитных сил не превысит силу поверхностного натяжения, отрыва капли от торца РЭ не произойдет, и она будет продолжать насыщаться металлом. Согласно заявлению авторов исследования, если на период от начала формирования капли и до достижения ею необходимой массы отключить подачу тока, то капля будет наращиваться быстрее. Последующее включение электрического тока, сопровождающееся большей удельной выделяющейся мощностью, а значит и плотностью тока, должно сорвать каплю металла с торца РЭ. При этом размер капли окажется меньше того, который она принимала при постоянно включенном токе. Авторы также утверждают, что основной причиной более продолжительного наращивания капли является

стягивание жидкого металла в пленке на торце РЭ под воздействием электромагнитных сил. В доказательство этого демонстрируется факт присутствия кольцевого нароста на торце РЭ при традиционной технологии ЭШП на переменном токе с РЭ без импульсного воздействия. Возникает некоторое сомнение в данном утверждении, так как воздействие магнитной составляющей электромагнитных сил при переменном токе считается незначительным, в том числе из-за поверхностного течения тока. Сила Ампера, которая воздействует на проводник тока направлена всегда от периферии к его центру, вызывая тем самым пинч-эффект. Эффект магнитного дутья нивелируется применением переменного тока. Таким образом, явление возникновения кольцевого нароста металла на торце РЭ вряд ли провоцируется воздействием электромагнитных сил, особенно при использовании переменного тока. Энергетическая эффективность данной технологии оправдана на счет увеличения удельной плотности тока в ШВ, вызванной частым каплепереносом, который является причиной снижения удельного сопротивления МВ. Увеличение плотности тока провоцирует повышение теплоты в подэлектродной зоне, тем самым расширяя тепловой центр. Возможно, что именно это увеличение количества теплоты является ликвидатором поверхностных дефектов на торце РЭ. Несомненно, что увеличение количества выделяемой теплоты провоцирует повышение температуры металла, из чего следует снижение вязкости металла в пленке на торце РЭ и, соответственно, облегчение срыва металлической капли более меньшего размера.

Применение импульсной технологии ЭШП оказывает влияние на тепловое распределение внутри ШВ [26]. Показано, что использование различной длительности бестокового промежутка напрямую влияет на количество тока, проходящего через ВК, распределение теплоты в объеме ШВ и, соответственно, качестве поверхности получаемого слитка. Значительное снижение длительности бестокового промежутка в цикловом периоде менее 0,4 с не оказывает значительного влияния на изменение количества тока, уходящего через ВК, что провоцирует потерю теплоты подэлектродной зоной из-за снижения плотности

тока. При использовании продолжительных бестоковых периодов в циклах длительностью более 6 с количество тока, уходящего в ВК меньше, чем при более коротких периодах, однако при этом происходит падение количества выделяемой теплоты в ШВ, что провоцирует активный нарос гарнисажа, ухудшая теплопроводность и, что более важно, качество поверхности получаемого слитка, формируя перетяжные кольцевые участки. При использовании импульсных циклов в интервале значений от 0,4 с до 6 с способствует оптимальному распределению теплоты в объеме ШВ за счет снижения потерь тока через стенку ВК.

Несмотря на то, что в данных исследованиях приводилась информация о модернизации печей ЭШП с РЭ, работающих на монофилярной схеме и переменном токе, данная технология может быть реализована на печах с постоянным током. С учетом того, что в печах на постоянном токе отсутствует индуктивное сопротивление, бестоковые периоды могут быть задействованы в более широком допуске. За счет обеспечения гарантированного измельчения капель металла, можно совершенствовать эту технологию путем применения разнополярного тока. Бестоковые периоды плавки при импульсном ЭШП должны способствовать сокращению высоты подэлектродной зоны, что должно сохранить равномерность распределения теплоты в ШВ даже при более продолжительных бестоковых периодах. Следствием этого каждый момент подачи тока в ШВ будет сопровождаться более сильным выделением теплоты в подэлектродной зоне при сравнении с импульсным ЭШП на переменном токе. Отсюда также вытекает снижение составляющей тока, идущей между РЭ и ВК при любой полярности тока. Смещенное расположение теплового центра в совокупности с импульсной подачей тока позволит снизить влияние магнитной составляющей электромагнитной силы, действующей на капли металла, что позволит стабилизировать процесс каплепереноса и снизить вероятность искажения формы фронта кристаллизации, делая ее более радиально-симметричной, аналогично технологии ЭШП с РЭ на монофилярной схеме с переменным током.

1.4. Цифровые двойники процесса ЭШП

Появление технологии ЭШП произошло спустя короткое время после наступления последней научно-технической революции. Наступление постнеклассического периода в науке было спровоцировано множеством факторов, основным из которых стало создание электронно-вычислительных машин (далее – ЭВМ). Дальнейшая их модернизация осуществлялась с целью увеличения количества решаемых прикладных и фундаментальных задач человеком. Для этого повышалась степень универсальности и доступности ЭВМ вплоть до достижения бытового уровня. ЭВМ позволила человеку построить совершенно новый взгляд на мир, предоставив ему собственноручно создавать множество виртуальных реальностей, моделирующих текущую действительность в настоящем, прошедшем и будущем времени. Последний фактор стал наиболее ценной возможностью ЭВМ при использовании человеком. Человек на протяжении всего своего существования стремился наиболее точно прогнозировать собственное будущее, так как от этого зависело его непосредственная безопасность и благополучие.

Несмотря на факт создания технологии ЭШП в постнеклассический период науки, ЭШП, как и другие технологии СЭМ, не изучался всесторонне преимущественно с использованием ЭВМ. Ответом на данную проблему является как отсутствие на тот момент методов изучения проблем, связанных с областью электротермии, так и подходящих специалистов, действующих одновременно в областях металлургии, прикладной математики и вычислительной техники. Дополнительным фактором являлось то, что создаваемые со временем компьютерные модели ЭШП имели множество ограничений, связанных в первую очередь с возможностью компьютерной реализации. Это влияло на точность результатов и узкую область их применимости, страдала общая достоверность сведений, полученных при использовании подобного метода исследований не только технологии ЭШП и иных металлургических процессов, но и вообще всех технических задач, изучаемых с помощью виртуальной симуляции. В связи со всем этим научно-исследовательские организации были вынуждены использовать

методологию натурного эксперимента в совокупности с рентгенологическими методами, являвшимися единственной доступной возможностью визуально наблюдать за протеканием физических процессов в ходе плавки. Работа по изучению оптически неясных для человека процессов в ШВ и МВ при ЭШП имела характер исследования полученных результатов плавки, требовала больших временных и материальных затрат, однако причисление отрасли СЭМ и всех связанных с ней сведений к области государственной тайны как в СССР, так и в странах Запада, не только способствовало наличию принципиальной возможности дальнейшего исследования данной технологии всеми доступными средствами, но и, к сожалению, не позволяла перенимать опыт других стран хотя бы ради избегания совершения одинаковых технологических ошибок [27].

Исследование электротермических и электромагнитных процессов в печах технологии СЭМ с помощью методов вычислительной гидродинамики на ЭВМ началось в 70-х годах прошлого столетия. Исследования производились чаще всего минимум двумя специалистами из разных областей науки и техники. Первые подобные тандемы представляют собой исследователи Зекели и Дилавари, Митчел и Келькар. Работа [28] первой пары является одним из первых задокументированных исследований одноэлектродной печи ЭШП с помощью вычислительной гидродинамики о влиянии электромагнитного воздействия на тепловую картину ШВ и МВ. Также были учтены условия передачи тепла под воздействием активных принудительных потоков и естественной конвекции в том числе с участием капельного переноса металла. Разработанная компьютерная модель позволяла получать наглядное представление о распределении количества теплоты, температурных участков, величины скорости и направленности конвективных потоков в жидких металле и шлаке. Результатом данной работы авторы считают возможность прогнозирования скорости плавления РЭ, выраженной в кг/с, по полученной эмпирической формуле для действующих установок ЭШП, работающих в диапазоне тока от 27 до 45 кА без уточнения его поляризации и напряжения в токоведущей сети. Данная работа вызвала интерес

среди отечественных специалистов СЭМ, что подтверждается проведением валидационных исследований [29] с целью опровергнуть или подтвердить некоторые аспекты в части гидродинамики компьютерного моделирования ЭШП с помощью физического моделирования. Результатом стало подтверждение достаточного уровня сходимости моделирования гидродинамики в ШВ печи ЭШП, однако вопрос о достоверности прогнозирования электромагнитных явлений и турбулентных потоков вблизи стенки ВК оставался открытым. Стоит также заметить, что, как и компьютерное моделирование, так и валидация физическим моделированием рассматривали интересующие области печи в двумерном продольном сечении, а процессом эволюции формы РЭ пренебрегали.

Митчел и Келькар проводили [30] дальнейшую работу по изучению влияния электромагнитных процессов на гидродинамику ШВ и МВ при ЭШП. Или была предложена разработанная обобщенная концепция моделирования ЭШП. По этой концепции модели включали в себя возможность одновременного совмещенного прогнозирования электромагнитных и гидродинамических явлений, а также теплопередачи при решении задач в осесимметричной стационарной постановке. В качестве одного из фактов новизны были указана возможность эффективного и точного анализа процессов переноса вещества и теплоты. Эта возможность обуславливалась за счет деления общей вычислительной области моделей на подобласти с переменной вязкостью для имитации жидкой, твердой фаз и состояния в пределах границ «ликвидус-солидус». Вторым фактором новизны был учет рода тока расчетными алгоритмами модели, что позволяло моделировать ЭШП на переменном токе. Выходными данными являлись числовые поля распределения Джоулева тепла в ШВ, величины силы Лоренца, форма МВ, и конвекция в ШВ и МВ с учетом внешнего воздействия электромагнитного воздействия и архимедовых сил. Валидация результатов на действующей печи ЭШП при выплавке слитка из стали марки Inconel 718 установила корреляцию между результатами моделирования и натурного эксперимента. Данная работа

подтвердила возможность моделирования процессов при ЭШП, что выражалось в плодотворности полученных результатов.

Исследователи Харича, Карими-Себаки и Людвиг проводили расширенные исследования в области технологии ЭШП. Кроме уже ранее известных работ по прогнозированию влияния электродинамических явлений на формирование слитка, которые были повторены Харичей и Людвигом на нестационарных компьютерных моделях [31], развивались тенденции повышения достоверности получаемых результатов и углубление в более детализированное моделирование отдельно взятых явлений в ЭШП на примере частных случаев разработки режимов работы печей. Работа [32] описывает характер возможных флуктуаций удельного сопротивления ШВ в ходе плавки и их воздействие на величину силы Лоренца на границах раздела фаз «шлак-металл» и «шлак-атмосфера». Установлено, что при высоких значениях удельного сопротивления шлака форма вышеуказанных границ раздела фаз принимает выгнутую форму, обращенную вовне ШВ. В работе [33] проводилось исследование направленности и величины электрического тока для случаев с непосредственно замкнутым на поддон и незамкнутым ВК. В результате было продемонстрировано, что изменение траектории движения электрического тока напрямую влияет на тепловую картину ШВ и потенциально возможную толщину гарнисажа. При рассмотрении гарнисажа в продольном сечении ШВ от границы раздела «шлак-атмосфера» до границы «шлак-металл» для незамкнутых ВК его толщина уменьшается. Для замкнутых ВК толщина гарнисажа увеличивается. Данный факт напрямую объясняется смещением и величиной воздействия тепловых центров, что было подтверждено валидационной плавкой. Дополнительно [34] на эту тему рассматривается влияние рода используемого тока на предмет качества внешней поверхности получаемого слитка. Спроектированная модель показала, что в случае с переменным током промышленной частоты 50 Гц наличие изолированности ВК от поддона не играет значительной роли относительно постоянного тока. При переменном токе на разомкнутом ВК увеличивается плотность тока ввиду того, что ВК в таком случае начинает

проявлять индуктивные свойства, тем самым выравнивая распределение теплоты. При использовании постоянного тока замкнутость ВК на поддон играет значительную роль: замкнутый ВК оттягивает через себя часть тока в направлении поддона, а незамкнутый формирует участок с повышенным тепловыделением на периферии ШВ и МВ. В работе [35] была разработана компьютерная модель, которая отражает воздействие процесса формирования капли и ее движения сквозь ШВ на электротехнические параметры печи ЭШП. Данное исследование в некоторой степени является модификацией работы [34], потому как ее предметом является изучение влияния присутствия, формы и движения капли металла в ШВ на параметры ее удельной электропроводности во времени. Последними достижениями данной исследовательской группы является разработка комплекса численных моделей [36-41] процесса ЭШП, учитывающих электрохимические процессы. Можно заявить, что было выдвинуто предположение о новой концепции представления процесса выделения и распределения тепла в ШВ, в которой источником является не просто сплошной шлак, описываемый произведением удельной электропроводности на электрический потенциал, но как совокупность концентраций ионов железа, кислорода, кальция, алюминия и прочих составляющих ШВ и жидкого металла. Новейшие представленные модели, олицетворяющие собой ионное представление взаимодействующих веществ, не выступают в противовес ранее используемому омическому представлению, но уточняют конечный результат ценой повышения комплексности математического аппарата компьютерной модели процесса ЭШП.

Проблема управления скрытыми процессами при ЭШП с целью оптимизации технико-экономических показателей печей рассматривалась как западными учеными, так и восточными. Количество публикации об исследованиях на тему моделирования и реализации применения внешнего воздействия значительно возросло в последнее десятилетие, особенно в азиатских странах. Ванг и Ли проводили работы с целью создания собственных практически применимых цифровых двойников для печей ЭШП. В работе [42] описана компьютерная

трехмерная модель трехэлектродной печи ЭШП, работающей на переменном трехфазном токе. Целью данной работы было получение сведений о тепловом распределении в ШВ и определение тепловых центров при использовании подобной компоновки печи. В качестве выходных данных были получены числовые поля распределения электромагнитного поля и теплоты, выделяемой в качестве Джоулева тепла. В результате было определено, что при использовании печей ЭШП подобной конструкции тепловые центры располагаются в подэлектродной зоне каждого из РЭ. Дополнительно была произведена визуализация числовых полей, демонстрирующих направленность и величину магнитного поля, которое изменялось каждый цикл подачи тока на РЭ. Исследование [43] проводилось с целью определения влияния низкочастотной вибрации в пределах от 0,1 до 1 Гц, прикладываемой поперечно к оси РЭ, на процесс кристаллизации металла при ЭШП через вычисление числовых полей электромагнитных явлений, гидродинамику ШВ и МВ и температурного поля. Была проведена валидационная плавка, с результатами которой проводилась корреляция результатов моделирования. В результате исследования было определено, что частота вибрации РЭ оказывает непосредственное влияние на размер капли металла, глубину МВ и предельную температуру в ШВ. Зависимость имеет характер близкий к линейному распределению. С увеличением частоты вибрации уменьшается средний диаметр капли металла, глубина МВ и предельная температура в подэлектродной зоне. С увеличением амплитуды колебаний ситуация аналогичная повышению частоте колебаний. Внешнее воздействие в виде вращения РЭ исследовалось в работе [44]. По своему качественному составу она не претерпела значительных изменений сравнительно с предыдущей, потому как колебательное движение было заменено на вращательное. Компьютерная модель симулировала процессы, протекающие в печи ЭШП при переменном токе 800 А и скорости вращения РЭ в интервале от 120 до 160 об/мин. Как и в случае с вибрирующим электродом, усиление внешнего воздействия в виде вращающегося РЭ приводило к измельчению капель, однако средняя температура ШВ и ее глубина

увеличивались. Данный факт об увеличении глубины ванны является закономерным, как следствие увеличения количества выделяемого Джоулева тепла, но форма фронта кристаллизации изменяла свой профиль с крутого мениска на более пологий. В исследуемом диапазоне скоростей вращения скорость плавки изменялась в пределах от 0,0078 кг/с до 0,0114 кг/с прямопропорционально. Значительным вкладом в развитие технологии ЭШП является создание компьютерной модели с учетом макросегрегации компонентов расплава в ходе плавки. Она близка к западной электрохимической концепции [36-41], однако она не учитывает сами электрохимические явления. Математический аппарат данных моделей, описывающий макросегрегацию, нацелен на определение распределение компонентов заранее известной начальной концентрации в зависимости от скрытых процессов при ЭШП. Влияние же внедряемых компонентов оказывается на процессы массопереноса металла и шлака, но не учитывает электрохимические процессы и не влияет на распределение и силу электромагнитных явлений. Плотность тока, как элемент электротермической составляющей математического аппарата модели, влияет на активность перемещающихся компонентов, но сами компоненты никаким образом не изменяют непосредственно электротермических показателей на уровне ионов, но лишь как следствие изменение массопереноса в теле ШВ. Труды [45-47] описывают данную модель на предмете изменения удельной концентрации углерода, марганца, хрома, никеля и молибдена при ЭШП, а также процесс десульфурации.

1.5. Рафинирующая способность технологии ЭШП и ее модификаций

Удаление ВП и газов из химического состава получаемой заготовки при ЭШП, к которым можно отнести серу, кислород, азот и водород, является важным критерием оценки качества работы печей данной технологии. В ходе переплава на рафинирующую способность оказывают влияние токовый режим, химический состав флюса, дисперсность включений в исходном металле, и параметры печной атмосферы, к которым относятся ее химический состав и величина избыточного давления. Кроме того, наличие конструктивных модификаций печи, создающих

прямое внешнее возмущающее воздействие гравитационной и электромагнитной природы на ШВ, МВ и тело РЭ, а также наличие повторных циклов плавки так же влияет на рафинирующую способность переплава.

1.5.1. Удаление серы

Во время этапа подбора флюса для ЭШП следует учитывать тот факт, что лучшим показателем десульфурации металла способствует использование фторсодержащих флюсов высокой степени основности. При осуществлении ЭШП на переменном токе наиболее часто используется флюс марки АНФ-6, сочетающий в себе оптимальную комбинацию показателей рафинирующих свойств и электропроводности. Однако наивысшими показателями десульфурации при ЭШП на переменном токе характеризуется флюс марки АНФ-7. При изменении рода тока на постоянный возникает вариативность в выборе оптимального флюса. При обратной полярности рекомендуется применение марок флюса АНФ-9 или АН-8 взамен наиболее распространенной марки флюса АНФ-6 для достижения наивысших показателей десульфурации металла. Прямая полярность тока не способствует эффективной десульфурации металла и для минимизации вероятности насыщения металла серой и сохранения ее текущей концентрации рекомендуется использовать марки флюса АНФ-1 и АН-8 взамен АНФ-6, АНФ-7 и АНФ-9, способствующих насыщению металла слитка серой.

Отмечается [48-50], что наилучшие показатели десульфурации достигаются при ЭШП на переменном токе. В то же время постоянный ток обратной полярности обладает несколько сниженными значениями относительно переменного. Вероятно, это связано с тем, что при обратной полярности тока тепловой центр смещается ближе к торцу РЭ, что повышает температуру металла в его окрестности, и, следовательно, способствует лучшей десульфурации. Но, находясь близко к поверхности ШВ, пересыщенной удаленной серой в виде свободных ионов и сульфидных соединений, часть серы возвращается в металл в пленке РЭ или препятствует эффективной диссоциации сульфидов в исходном металле на ионы. Постоянный ток прямой полярности не способствует эффективному

удалению серы из металла на основании фундаментальных физико-химических особенностей электролиза, подтверждаемых результатами опытных плавок и их цифровых двойников. Ионы серы, имеющие заряд S^{2-} , притягиваются к аноду, расположенному на поверхности МВ и стенках ВК, что в свою очередь препятствует десульфурации и способствует обратному процессу – насыщению металла серой из объема ШВ. Эта особенность ЭШП на постоянном токе требует использования марок флюса с наибольшим показателем степени основности для предотвращения насыщения металла заготовки серой.

Величина силы тока при ЭШП напрямую влияет на количество выделяемого тепла, и, следовательно, на степень десульфурации. Результаты исследований [50, 51] по проведению ЭШП на постоянном токе обратной полярности переменной величины указывают на отсутствие прямой зависимости между увеличением силы тока и количественным ростом показателей удаления серы в получаемой заготовке конструкционной марки стали AISI 201. При использовании кристаллизатора диаметром 120 мм наивысшая степень десульфурации металла наблюдалась при 1,5 кА, однако при дальнейшем увеличении силы тока до 2,4 кА степень десульфурации только падала. Авторы ссылаются на увеличение удельного размера капель металла, объем которых увеличивается непропорционально площади их поверхности, что влечет за собой увеличение удельной массы сульфидов, не успевших пройти через границу раздела «металл-шлак» на поверхности капли.

В части изменения токового режима можно рассматривать снижение частоты переменного тока с уровня значений промышленной частоты до порядка нескольких единиц Герц. Исследования Паара [52, 53] по влиянию тока низкой частоты величиной в 1 Гц на степень десульфурации металла в сравнении с постоянным током прямой и обратной полярностей демонстрируют результаты, согласно которым зафиксировано повышение рафинирующей способности ЭШП на токе малой частоты в части удаления серы по сравнению с ЭШП на постоянном токе. Паар также отметил, что повышение частоты тока до значений порядка 5 Гц

ухудшает десульфурацию сталей, что было подтверждено его выкладками по переплаву аналога марки стали 4X5МФС – X37CrMoV5-1.

1.5.2. Удаление газов

ЭШП имеет ограниченную способность дегазации металла. Наиболее явно наблюдается процесс раскисления металла, который стимулируется преимущественно использованием синтетических флюсов высокой основности перед началом переплава или непосредственным добавлением элементов с высоким сродством к кислороду по ходу ведения переплава через дозаторы непосредственно на открытую поверхность ШВ. Способность ЭШП к раскислению металла находится в равном приоритете с десульфурацией по причине наиболее выраженного проявления именно этих эффектов в части рафинирования металла при переплаве. Способность ЭШП удалять кислород в конечном металле является одной из основополагающих причин существования ЭШП, по крайней мере на период раннего развития данной технологии и отсутствия технологии внепечной обработки металла. В работе [54] проводилось изучение влияния токового режима на степень раскисления металла при ЭШП с открытой печной атмосферой коррозионнотойкой марки стали 304L с использованием флюса, схожим по химическому составу с маркой АНФ-6. Авторы работы утверждают, что наибольшей эффективностью раскисления металла обладает технология ЭШП на переменном токе промышленной частоты 50 Гц. Снижение частоты тока до значений порядка 10-2 Гц снижает раскисляющую способность ЭШП в среднем на 70-80% соответственно относительно ЭШП на переменном токе. Наихудшие показатели удаления кислорода наблюдаются при ЭШП на постоянном токе, причем насыщенность металла кислородом при использовании тока обратной полярности хуже в 2,5 раза, чем на переменном токе, а при использовании прямой полярности – в 4 раза, что составляет приблизительно 150% и 300% соответственно. Разница в степени удаления кислорода на токах прямой и обратной полярности оправдывается фундаментальными сведениями о поведении ионов, которым не противоречат результаты опытных плавок в данной работе. Однако

стоит заметить, что без использования вакуумирования даже при ЭШП на переменном токе концентрация кислорода увеличилась в среднем на 50% относительно исходной концентрации в теле РЭ, равной 0,0025%. Основная форма, в которой представлен кислород в металле заготовки ЭШП, является оксид алюминия Al_2O_3 . Далее идут оксиды железа, магния, кремния и марганца. Отдельную позицию занимают оксисульфиды, концентрация которых на переменном токе снижается максимально в том числе и относительно исходного металла РЭ. Заметных отличий между прямым током обратной полярности, током низкой частоты и переменным током промышленной частоты в части изменения относительной доли оксидных включений не наблюдается, но ЭШП на постоянном токе прямой полярности значительно увеличивает долю оксисульфидов и оксидов металлов, в число которых также входит алюминий. Несмотря на тот факт, что удаление кислорода на всех токовых режимах ЭШП осуществляется хуже, чем на переменном токе, при этом наблюдается уменьшение размера включений оксидов и увеличивается равномерность их распределения по телу наплавляемой заготовки, что свидетельствует об увеличении плотности получаемого металла, а соответственно и об увеличении изотропности его физико-механических свойств.

Исследование Янга и Митчела [55] о влиянии азота при выплавке спецсталей и сплавов на основе никеля описывает влияние азота на свойства металла и изменение его свойств при увеличении и снижении концентрации азота в теле получаемого слитка. Известно, что увеличение концентрации азота способствует увеличению прочности, твердости, измельчению зерна и стабилизации аустенитной структуры. С другой стороны, азот и нитридные соединения провоцируют возникновение дефектов структуры слитка в виде микроскопических пор, трещин и несплошностей в теле заготовки, что является нарушением изотропности ее физико-механических свойств, снижает сопротивление усталости металла, а также делает его непригодным для ответственных отраслей по типу авиационной и космической промышленности. Наиболее эффективным способом удаления азота является вакуумирование, которое может быть осуществлено при

ВДП, ВИП, ЭЛП и ПДП. При ЭШП азот может быть удален из переплавляемого металла путем образования нитридных соединений с титаном, цирконием, ниобием, алюминием и магнием [56]. Эти компоненты приведены в порядке убывания их сродства к азоту. Однако удалять азот путем введения нитридообразующих компонентов довольно проблематично, так как при увеличении числа соединений нитридов растет число карбидов. Поэтому удалять азот подобным образом рекомендуется только в сталях с предельно низким содержанием углерода во избежание превышения концентрации карбидов в конечном металле. Существуют [57] также способы фильтрации металла путем расположения глиноземных фильтрующих элементов на пути его движения, однако данная технология может применяться только для удаления остаточного азота после вакуумирования. Поверхность глинозема обладает большей смачиваемостью для нитридов титана, поэтому они фиксируются на ней. Нитриды титана являются частицами с малой плотностью, поэтому они с довольно большой вероятностью будут всплывать на поверхность ШВ, особенно если шлак будет насыщен добавками чистого алюминия, а атмосфера печи – вакуумироваться. Дополнительным условием к соблюдению удаления азота должно быть отсутствие значительного превышения температуры металла над границей «ликвидус», так как при увеличении температуры металла растворимость нитридов в металле увеличивается. В работе [58] показаны результаты исследования выплавки высокопрочных беститанистых марок стали, в составе которых присутствовали хром (порядка 2%), никель (порядка 3%), молибден (порядка 0,35%), вольфрам (порядка 1,5%) с использованием вторичного переплава металла, полученного в индукционной печи, с помощью ЭШП на переменном токе. Авторы фокусируют внимание на том, что использование флюса, близкого по составу к марке АНФ-8, позволило осуществить удаление азота в полученном металле в результате ЭШП в диапазоне от 8% до 63% в зависимости от исходного химического состава стали. По результатам исследования наблюдается корреляция изменения концентрации

азота с концентрацией углерода: металл после ЭШП с самой низкой изначальной концентрацией углерода обладал наивысшей степенью удаления азота.

Удаление водорода из металла является важнейшей задачей, в частности для коррозионностойких марок сталей и сплавов высокой прочности, применяемых, например, в трубном прокате для транспортировки нефти и газа, богатых сероводородом. Водород – причина образования флокенов в структуре металла, являющихся следствием медленного, незаметного человеческому глазу, но крайне разрушительного коррозионного воздействия. Соединения с водородом представляют собой гидроксиды и бинарные соединения и являются крайне стойкими относительно оксидов и нитридов, поэтому с легкостью растворяются в металле. В содержании используемых флюсов отсутствуют легковыводимые компоненты, обладающие значительным сродством к водороду при температурах около 1600-2000°C, а значит, что для разрушения соединений с водородом требуется значительное повышение температуры, что недопустимо при ЭШП. Удаление водорода наблюдается в технологиях СЭМ, где используется постоянный ток, а значит и наличие ионизации как результат электролиза. При ЭШП на переменном токе удалить водород невозможно, но использование поляризации тока создает условия для разрушения водородных соединений, и, тем самым, расширяет технологические возможности ЭШП. Существуют работы [59-61], которые описывают поведение водорода при получении стальных слитков с помощью ЭШП. Данные исследования описывают влияние химического состава ШВ и печной атмосферы на степень удаления водорода из металла при ЭШП, однако работ, описывающих практический результат применения поляризации тока на поведение водорода, не было обнаружено. Авторы работ указывают, что при ЭШП на переменном токе постоянно существует возможность насыщения конечного металла водородом в виде гидроксидных и бинарных соединений по типу $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, H_2S , и рекомендуют заполнять печную атмосферу аргоном во избежание избыточного насыщения ШВ парами воды из атмосферного воздуха.

Данный факт был косвенно подтвержден результатами исследования [62], проводимого с целью определения насыщения металла в различных атмосферах.

1.5.3. Удаление неметаллических включений

Кроме газов и ВП на качество металла ЭШП оказывают влияние и НВ. НВ в виде сульфидов, нитридов и оксидов изменяют металлическую структуру слитка в процессе его формирования, провоцируя возникновение дислокаций. В результате чего изменяются предельные значения прочности изделия, особенно для изделий, работающих в условиях повышенной или экстремальной нагрузки. Фактически ВП снижают эксплуатационные свойства за счет нарушения изотропности физико-механических свойств.

Известно [63-65], что по своей форме, плотности и размеру НВ неоднородны. При ЭШП стали контактирование металла капли, поверхности МВ и пленки торца РЭ со шлаком способствует удалению НВ, однако в обычных условиях степень их удаления невелика. Наибольшее число НВ составляют частицы размером менее 5 микрон, которые крайне тяжело выводятся из металла только за счет всплытия из-за низкой плотности. Более мелкие частицы переходят в металл слитка вместе с каплями и оседают на дне металлической ванны. В случае, если частица крупнее, чем расстояние между осями дендритов, частица будет перемещаться вместе с фронтом кристаллизации. Аналогично принципу вытеснения ВП и НВ в центр слитка в технологии получения отливок в изложницах при ЭШП на переменном токе ВП вытесняются в мениске МВ перпендикулярно фронту кристаллизации и фиксируются центральной части слитка. Данную ситуацию усугубляют существующие конвективные потоки, спадающие в центральной части и поднимающиеся на периферии МВ, которые «вбивают» НВ в дно МВ.

Можно [66, 67] создать условия, при которых удаление более мелких по размеру НВ будет осуществляться более эффективно, особенно для остроугольных частиц неправильной формы. Так как НВ неминуемо попадают в формируемый слиток, значит они присутствуют на всех этапах агрегатного преобразования металла: в пленке на торце, в капле и МВ. Если более мелкие частицы не способны

всплывать самостоятельно, то необходимо спровоцировать их движение и поддерживать его на протяжении всего необходимого времени, фактически «выдавлив» их. На любые объекты в объеме любой жидкости действует гидростатическое давление со всех сторон с одинаковой силой. Так как включение легковесно, то оно обладает силой Архимеда, величины которой недостаточно для преодоления гидростатического давления в совокупности с межфазным трением. Сократив расстояние между НВ и ШВ, т.е. уменьшив толщину окружающего металла, а, следовательно, и окружающее гидростатическое давление более плотной среды относительно шлака, можно достичь условий более интенсивного удаления НВ. Известно [68], что капля металла довольно близка к форме шара. При изменении размера сферы площадь ее поверхности и внутренний объем изменяются непропорционально и внутренний объем уменьшается более стремительно. Например, если взять сферу и уменьшить ее радиус вдвое, то площадь поверхности сократится в 4 раза, а внутренний объем – в 8 раз, что объясняется наличием квадратной и кубической степеней радиуса для площади и объема соответственно. Из этого можно заключить, что уменьшать размер капли является выигрышной стратегией, так как при сокращении ее объема площадь контактной поверхности всегда сокращается медленнее, что способствует увеличению шансов перехода НВ в ШВ. И чем дольше она будет пребывать в контакте с ШВ, тем выше степень общего рафинирования капли металла и шанс удаления более мелкого включения. Аналогичная стратегия применима и для удаления НВ в пленке металла на торце РЭ, что описано в работах [69, 70]. Ее утончение и увеличение скорости потока внутри нее провоцирует увеличение степени удаления НВ размерных групп от 10 до 25 микрон и делает возможным удаление НВ размером от 1 до 10 микрон. Также отмечается, что концентрация НВ в центральной части слитка снижается при использовании вращения тела РЭ за счет изменения формы фронта кристаллизации и направления роста дендритов первого порядка в продольном и радиально-продольном направлениях.

Выводы по главе 1

ЭШП определенно является наиболее вариативной технологией вторичного переплава сталей и сплавов. Печи данной технологии обладают широкой возможностью как конструктивной модификации, так и применения флюсов и легирующих компонентов для стабилизации и доводки физико-механических свойств и химической однородности получаемых слитков. За счет своей технологической гибкости и простоты ЭШП может усовершенствовать как свою производительность, так и рафинирующую способность.

Предлагаемая к разработке монофилярная технология ЭШП на постоянном токе рассматривается в качестве технологического решения для повышения производительности малых печей ЭШП с повышением показателей изотропности физико-механических свойств получаемых слитков и без потери гомогенности их химического состава. В качестве материального источника реализаций предлагается модернизация действующих фондов печей ВДП и ЭШП, работающих на переменном токе. Применение постоянного тока является эффективным средством повышения производительности плавки за счет снижения токовых потерь при повышении удельной плотности тока и перераспределении выделяемой резистивной теплоты в объеме ШВ при использовании необходимой поляризации тока. Негативным аспектом применения постоянного тока является неконтролируемая потеря изотропности физико-механических свойств слитка в результате блуждания тепловых центров ШВ и формы фронта кристаллизации вследствие неизбежного возникновения эффекта, проявляемого магнитной составляющей электромагнитной силы, именуемого магнитным дутьем и рассматриваемого как негативный фактор осуществления плавки при ЭШП на постоянном токе. Были перечислены некоторые модификации печи ЭШП, которые предназначены для подавления магнитного дутья, соответствующие изначальной принадлежности печи к технологии ВДП или ЭШП на переменном токе. Выбор конечной модификации печи ЭШП осуществлялся не только с целью повышения производительности печи и подавления магнитного дутья, но и осуществления

управлением расположения теплового центра и траекторией движения и падения капель металла с торца РЭ.

Рафинирующая способность ЭШП в части удаления ВП и газов значительным образом изменяется при изменении токового режима работы печи ЭШП. При использовании обратной полярности наблюдается сохранение эффективной десульфурации и раскисления металла. Эффективное удаление азота обеспечивается прежде всего шлаковым режимом, при котором существует достаточное количество легковесных нитридообразующих компонентов, но также важно соблюдать обратную полярность для удаления ионов азота с отрицательной степенью окисления аналогично кислороду и сере. Использование постоянного тока прямой полярности дает возможность наделить ЭШП новым свойством – удалением водорода, которое в совокупности с изменением расположения теплового центра на поверхности МВ улучшает технико-экономические показатели технологии ЭШП. Создание условий для предотвращения насыщения металла серой, кислородом и азотом является важным фактором для реализации предлагаемой технологии ЭШП.

Определено, что в настоящее время наиболее эффективным способом разработки технологии ЭШП на постоянном токе с компенсирующим воздействием следует рассматривать совокупность создания комплексной компьютерной модели, осуществляющей моделирование поставленной задачи в рамках вычислительной магнитогидродинамики с применением численного метода конечных объемов, с последующей валидационной плавкой на действующей печи ЭШП. Обнаружено, что использование подобной методологии исследования начало впервые применяться в восьмидесятых годах прошлого столетия в виде, результатом которого следовало получения некоторых числовых полей распределения температур и плотностей тока на двухмерных проекциях ШВ и МВ. Тенденции последних двадцати лет развили применимость компьютерного моделирования до уровня составления комплексных моделей ЭШП, учитывающих не только гидродинамику и кинетику процесса, но и электротермические,

электрохимические и термодинамические явления. Данные результаты были получены преимущественно зарубежными научными коллективами. Однако, в их работах существуют некоторые недостатки, связанные как с неучетом факта эволюции формы РЭ, так и с рассмотрением факта явного вращения РЭ с возможностью поляризации тока. Использование компьютерного моделирования представляется в качестве эффективной возможности создания такой технологии ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ, при которой будет возможно осуществления динамического контроля за качеством свойств получаемого слитка. Результатом этого моделирования должно выступить создание комплексного цифрового двойника монофилярной технологии ЭШП с РЭ на постоянном токе.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Формулировка задачи

При вращении расходуемого электрода создается гравитационное поле, представленное наложением центробежной силы на капли металла, формируемые в процессе его каплепереноса. Известно, что сила Лоренца, действующая на капли металла, движущиеся в постоянном магнитном поле, постоянно и неконтролируемо изменяет свое направление. Однако при оценке ее величины можно создать компенсирующее воздействие на капли металла и металлическую пленку на торце расходуемого электрода в виде центробежного ускорения. В случае, если величина центробежной силы, действующей на капли металла, будет достаточной, можно гарантировать снижение влияния эффекта магнитного дутья или полностью подавить его.

Эволюция структуры слитка и образование дефекта послойной кристаллизации в процессе наплавки представлена на рисунке 1.

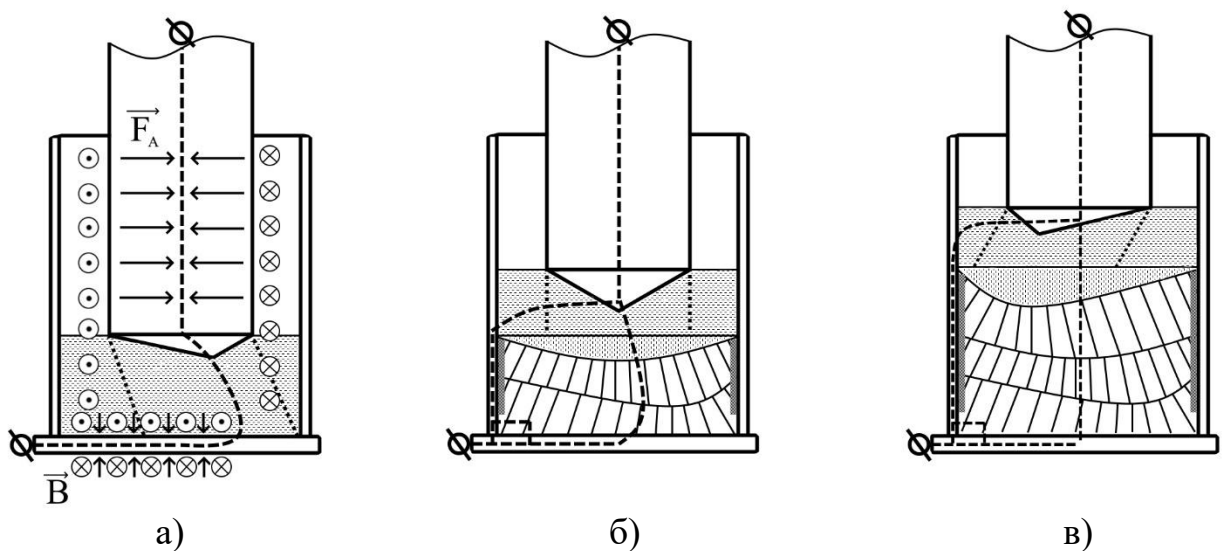


Рисунок 1 – Эволюция формы расходуемого электрода, структуры слитка и пути электрического тока под действием эффекта магнитного дутья при ЭШП на постоянном токе: а) – начало плавки; б) – после начала плавки; в) – середина и конец плавки; B – магнитная индукция; F_A – сила Ампера

Эффект вращения расходуемого электрода на металл принципиально схож с эффектом, возникающим при наложении внешнего магнитного поля с помощью катушки, расположенной вокруг водоохлаждаемого кристаллизатора. В обоих случаях возникает активное вращение шлаковой и металлической ванн. Однако при воздействии внешнего магнитного поля на границе раздела фаз между шлаковой ванной и металлической пленкой на торце расходуемого электрода жидкий шлак начинает увлекать за собой жидкую металлическую пленку под действием силы межфазного поверхностного натяжения. При использовании вращения расходуемого электрода его тело захватывает шлаковую ванну и передает ей сонаправленное вращательное движение, которое постепенно затихает от центра к периферии. Внешнее магнитное поле, создаваемое катушкой способно лишь измельчать капли металла на периферии торца расходуемого электрода под действием поверхностного натяжения, и не оказывает значительного эффекта на капли в его центральной части. Вращение расходуемого электрода имеет непосредственное воздействие на весь жидкий металл, формируемый на его торце вплоть до его отрыва в виде капель из-за создания поля гравитационных сил. Подавлять эффект магнитного дутья возможно при использовании обоих этих способов, однако технология с вращением расходуемого электрода позволяет обеспечить не только эффективное подавление сил Ампера, воздействующих на металлическую пленку на торце расходуемого электрода и, непосредственно, на капли металла при каплепереносе сквозь шлаковую ванну, но и управление их траекторией движения в шлаковой ванне и падения на поверхность металлической ванны. На рисунке 2 представлена схема с ориентировочными траекториями падения капель металла при стационарном (или вращающемся с недостаточной скоростью расходуемым электродом) и вращающемся расходуемым электродом на оптимальной скорости.

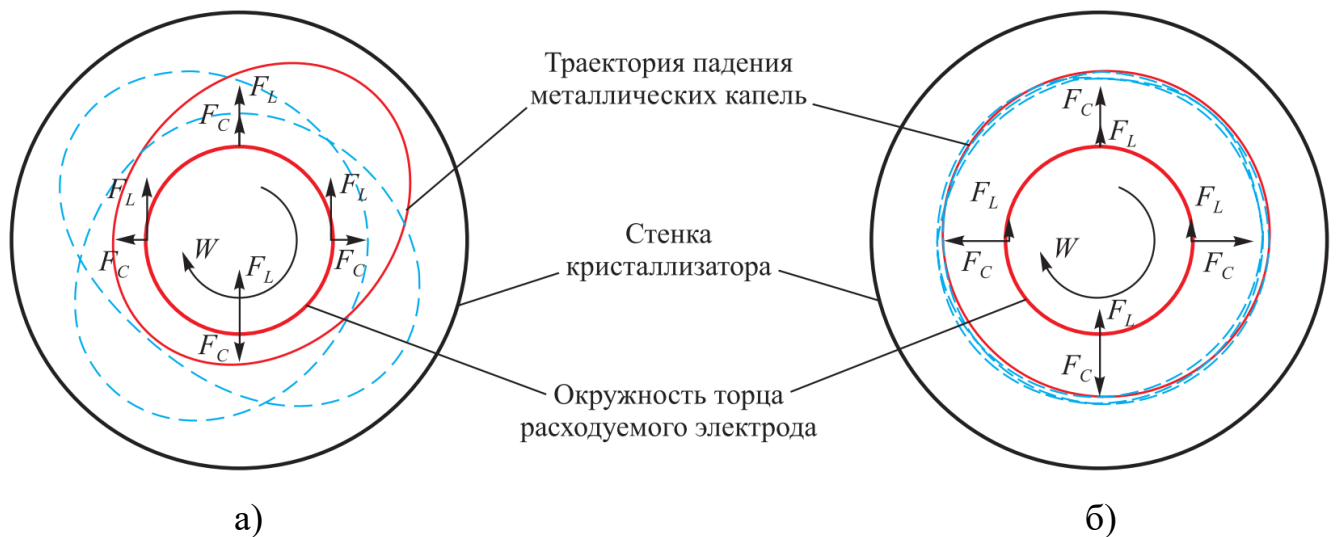


Рисунок 2 – Траектории падения капель металла и векторы воздействующих сил:

- а) стационарный или вращающийся с недостаточной скоростью расходуемых электрод; б) вращающийся с оптимальной или избыточной скоростью расходуемый электрод; F_L – сила Ампера; F_C – центробежная сила

Из рисунка 2 видно, что с помощью воздействия вращения расходуемого электрода можно эффективно подавлять эффект магнитного дутья при любых условиях и управлять траекторией падения капель металла за счет величины центробежной силы, зависящей напрямую как от скорости вращения расходуемого электрода, так и от его диаметра.

Вопрос о повышении энергоэффективности печи ЭШП на постоянном токе решается при управлении расположением теплового центра и количеством выделяемого в нем теплоты по закону Джоуля-Ленца. Постоянный ток позволяет обеспечить поляризацию зарядов в шлаковой ванне, что непосредственно влияет на расположение теплового центра. Интенсивность выделения Джоулева тепла зависит напрямую от удельной плотности тока. В объеме шлаковой ванны работающей печи ЭШП удельная электропроводность примерно одинакова, но изменяется прямопропорционально удельной температуре в ней. Капли металла, движущиеся сквозь шлаковую ванну, выступают местами с повышенной электропроводностью и создают кратковременные ответвления движения тока сквозь них. Измельчение капель и их учащенное образование является

предпосылкой к увеличению удельной плотности тока в шлаковой ванне. На рисунке 3 изображена схема с распределением теплоты в шлаковой ванне при стационарном и вращающемся расходуемых электродах.

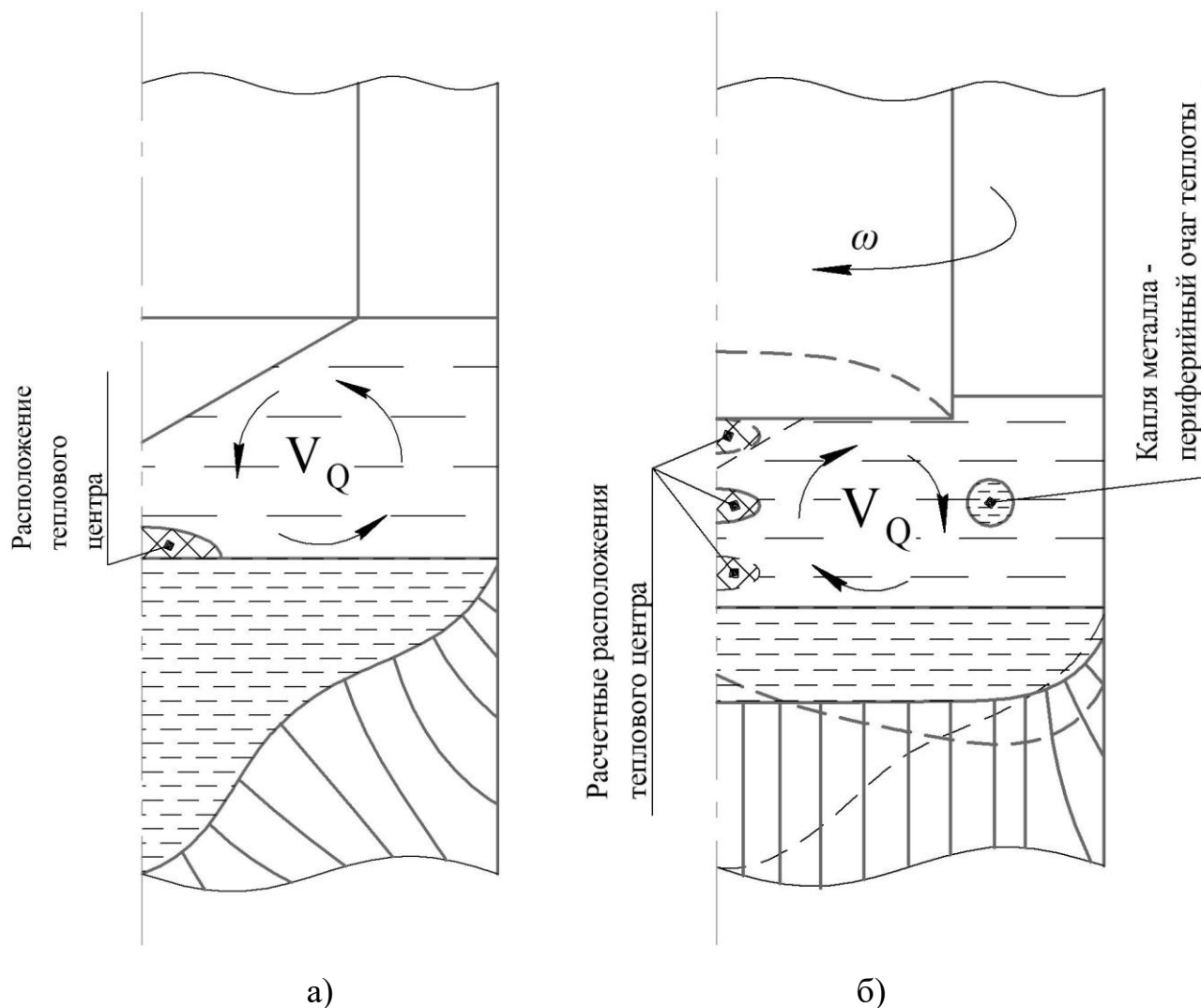


Рисунок 3 – Расположение тепловых центров и направленность конвективных потоков при стационарном а) и вращающемся б) расходуемых электродах при прямой полярности тока: V_Q – конвекция в шлаковой ванне; ω – угловая скорость

Из рисунка 3 видно, что при использовании постоянного тока прямой полярности тепловой центр в шлаковой ванне располагается на ее границе раздела с металлической ванной. Данное смещение формирует глубокий мениск в получаемом слитке, вертикальная протяженность которого увеличивается в результате осевого капельного переноса металла. Следует сделать замечание, что

здесь не учтен эффект магнитного дутья для обеспечения сравнительной наглядности с технологией с вращением расходуемого электрода. При вращении расходуемого электрода наблюдается активное движение шлаковой ванны и конвективных потоков внутри ее, которые обращены в обратном направлении по сравнению со стационарной технологией. Капельный перенос смещается из центра на периферию шлаковой ванны, что в совокупности с измененной направленностью конвективных потоков изменяет форму фронта кристаллизации, делая металлическую ванну более полой, что благоприятно влияет на кристаллическую структуру слитка. По мере увеличения скорости вращения расходуемого электрода увеличивается интенсивность капельного переноса и скорость конвективных потоков, которые теперь омывают торец расходуемого электрода снизу вверх вдоль его оси. В совокупности с прямой полярностью тока можно добиться эффекта смещения теплового центра вдоль оси расходуемого электрода и слитка. При превышении критических значений может возникнуть образование вогнутого торца расходуемого электрода, что снижает интенсивность капельного переноса, увеличивает размер капли, и, соответственно, является недопустимым условием плавки. Также может возникнуть образование периферийного мениска в металлической ванне. Сведения об исследовании данной проблемы с помощью физического моделирования приведены в [71].

Определение эффективного токового режима с соответствующим режимом вращения расходуемого электрода возможно получить в результате построения численной модели процесса, работающим по принципам вычислительной гидродинамики. Данный подход эффективно применялся для исследования ЭШП, начиная с самых первых стационарных задач до нестационарных магнитогидродинамических с многофазным течением.

2.2. Математический аппарат численной модели

Математический аппарат состоит из трех основных разделов: электромагнитные явления, гидродинамика жидкости и кинетика тепловых явлений [72, 73]. Все уравнения и законы во всех разделах представлены в виде,

способном описать решение комплексной задачи в частных производных с помощью численного моделирования на ЭВМ [74-77].

Электромагнитная часть модели описывает возникновение электрического тока и самонаведенного магнитного поля вокруг потока заряженных частиц. В объеме ШВ и МВ активно проявляется пинч-эффект и его частный случай – магнитное дутье – вызванный несимметричностью подключения элементов печи и присутствием радиальной составляющей тока в токопроводящем ВК. Для реализации электромагнитной части используется « $A - \varphi$ » представление электромагнитной природы тока [78].

Неразрывность потока заряженных частиц описывается векторным уравнением:

$$\operatorname{div}(\vec{J}) = 0, \quad (1)$$

где div – оператор дивергенции; $\vec{J}$ – вектор плотности тока. Расписав (1) в дифференциальной форме, получим:

$$\frac{\partial \vec{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{J}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{J}_z}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где $\vec{J}_x, \vec{J}_y, \vec{J}_z$ – составные компоненты вектора плотности тока по осям в декартовой системе координат. Возникновение электрического тока обуславливается наличием разности потенциалов, которая формирует электрическое поле. Напряженность электрического поля описывается векторным уравнением:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad}(\varphi) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электрического поля; grad – оператор градиента; φ – электрический потенциал; $\vec{A}$ – магнитный потенциал; τ – временной шаг. Расписав (3) в дифференциальной форме, получим:

$$\vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – компоненты единичного вектора декартовой системы координат. Плотность тока заряженных частиц описывается векторным уравнением:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial \tau} = -grad(\varphi) + div(\sigma grad(\vec{J})), \quad (5)$$

где σ – электропроводность среды. Расписав (5) в дифференциальной форме, получим:

$$\frac{\partial \vec{J}}{\partial \tau} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + \sigma \left(\frac{\partial^2 J}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 J}{\partial z^2}\right), \quad (6)$$

Сталь при нагреве выше температуры порядка 700-800 °С изменяет свои магнитные свойства, становясь парамагнетиком полностью потеряв ферромагнитные свойства. Таким образом, жидкая сталь получает слабую склонность к намагничиванию, находясь исключительно в магнитном поле. Магнитные явления описываются присутствием магнитной индукции и магнитного потенциала, которые связаны векторным уравнением:

$$\vec{B} = rot(\vec{A}), \quad (7)$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; rot – оператор ротора. Расписав (7) в дифференциальной форме, получим:

$$\vec{B} = \left(\frac{\partial \vec{A}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{A}_y}{\partial z}\right) \vec{i} + \left(\frac{\partial \vec{A}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial x}\right) \vec{j} + \left(\frac{\partial \vec{A}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{A}_x}{\partial y}\right) \vec{k}, \quad (8)$$

где $\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$ – декартовы компоненты векторного поля магнитного потенциала.

Сила Ампера, являющаяся макроскопической интерпретацией силы Лоренца для проводников с током, описывается векторным произведением по правилу левой руки, на что указывает уравнение:

$$\vec{F}_A = \vec{J} \vec{B}, \quad (9)$$

где $\vec{F}_A$ – сила Ампера. Применение силы Ампера имеет место как для твердых, так и для жидких проводников. Данный компонент используется в гидродинамике жидкости, связывая магнитную составляющую тока с вектором скорости движения потока.

Тепловой эффект, получаемый в результате работы электрического тока, и именуемый Джоулевым теплом, описывается законом Джоуля-Ленца, приведенном в уравнении:

$$Q_{\text{дт}} = \frac{1}{\sigma} J^2, \quad (10)$$

где $Q_{\text{дт}}$ – теплота, выделяемая по закону Джоуля-Ленца. Данный компонент использован в кинетике тепловых явлений, связывая электрическую составляющую тока с температурным полем потока.

Гидродинамическая часть модели описывает пофазный перенос компонентов потока без возможности их смешивания. Транспортное уравнение потока в векторной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial \tau} + (\rho \vec{v}) \text{div}(\vec{v}) = -\text{grad}(p) + \text{div}(\eta \text{grad}(\vec{v})) + \vec{F}_A + \vec{F}_b + S_{sm}, \quad (11)$$

где ρ – плотность фазы; $\vec{v}$ – вектор скорости потока; p – полное давление в точке потока; η – динамическая вязкость среды; $\vec{F}_b$ – сила Архимеда (межфазная плавучесть); S_{sm} – исток/сток кристаллизации/плавления среды. Расписав (11) в дифференциальной форме, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial \tau} + \rho \vec{v} \left(\frac{\partial \vec{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}_z}{\partial z} \right) = \\ & = - \left(\vec{i} \frac{\partial p}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial p}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \vec{F}_A + \vec{F}_b \\ & + S_{sm}. \end{aligned} \quad (12)$$

Законы сохранения массы требуют обеспечения неразрывности несущей величины, чем является скорость в транспортном уравнении, поэтому неразрывность гидравлического потока описывается векторным уравнением:

$$\text{div}(\vec{v}) = 0, \quad (13)$$

которое в дифференциальной форме примет вид:

$$\frac{\partial \vec{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}_z}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

Сила Архимеда описывается фундаментальным уравнением без явного указания объема жидкости, которое имеет вид:

$$\vec{F}_b = \rho \vec{g}, \quad (15)$$

где $\vec{g}$ – ускорение свободного падения. Кристаллизация/плавление в численных моделях описывается как регулирование скорости потока умножением на коэффициент от 0 до 1, т.е. как стоковый/истоковый член уравнения, что описывается уравнением:

$$S_{sm} = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 - 0,001)} A_{sm} \vec{v}, \quad (16)$$

где β – объемная доля жидкой части фазы; A_{sm} – коэффициент зоны ликвидус-солидус. Определение объемной доли жидкой части фазы зависит от текущей температуры жидкости и ширины температурного интервала ликвидус-солидус для случаев неизотермического агрегатного преобразования, что выражается системой уравнений [79]:

$$\begin{cases} \beta = 0 \text{ если } T < T_{\text{солидус}} \\ \beta = 1 \text{ если } T > T_{\text{ликвидус}} \\ \beta = \frac{T - T_{\text{солидус}}}{T_{\text{ликвидус}} - T_{\text{солидус}}} \end{cases}, \quad (17)$$

где T – температура потока; $T_{\text{солидус}}$ – температура границы «солидус»; $T_{\text{ликвидус}}$ – температура границы «ликвидус».

Часть численной модели, описывающая кинетику тепловых явлений в потоке, аналогична формально не выделяется из гидродинамической части ввиду того, что транспортное уравнение энергии отличается от транспортного уравнения массы только переносимым скаляром или вектором [80]. Сохранение энергии описывается транспортным уравнением в векторной форме, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial \tau} + (\rho H) \text{div}(\vec{v}) = \text{div}(\lambda \text{grad}(T)) + Q_{JH}, \quad (18)$$

где H – полная энергия системы; λ – коэффициент теплопроводности среды; ΔH – приращение энергии, вызванное агрегатным преобразованием вещества и выделением/поглощением скрытой теплоты плавления среды. Расписав (18) в дифференциальной форме, получим:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial \tau} + \rho H \left(\frac{\partial \vec{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}_z}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{JH}, \quad (19)$$

Приращение энергии можно определить как произведение объемной доли фазы на скрытую теплоту плавления, что описывается уравнением:

$$\Delta H = \alpha L, \quad (20)$$

где α – объемная доля фазы в потоке; L – скрытая теплота плавления фазы.

Полная энергия потока учитывает текущую энтальпию системы и скрытую теплоту плавления, что можно описать уравнением:

$$H = h + \Delta H, \quad (21)$$

где h – текущая энтальпия потока при заданной температуре; ΔH – приращение энергии, вызванное агрегатным преобразованием вещества и выделением/поглощением скрытой теплоты плавления среды. Рассчитать текущий уровень энтальпии потока можно по уравнению:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (22)$$

где h_{ref} – значение энтальпии, от которого берутся все изначальные показатели среды, или т.н. «реферная» энтальпия; T_{ref} – температура, от которой берутся все изначальные показатели среды, или т.н. «реферная» температура; c_p – удельная теплоемкость среды.

2.3. Граничные и начальные условия численной модели

Для реализации численной модели, решаемой методом конечных объемов, предложена расчетная сетка [81], осесимметричный эскиз которой приведен на рисунке 4 с указанием основных элементов действующей печи ЭШП А-550. Расчетная сетка имеет одну область, состоящую из двух подобластей, что необходимо для реализации вращения тела расходуемого электрода в стационарный кристаллизатор.

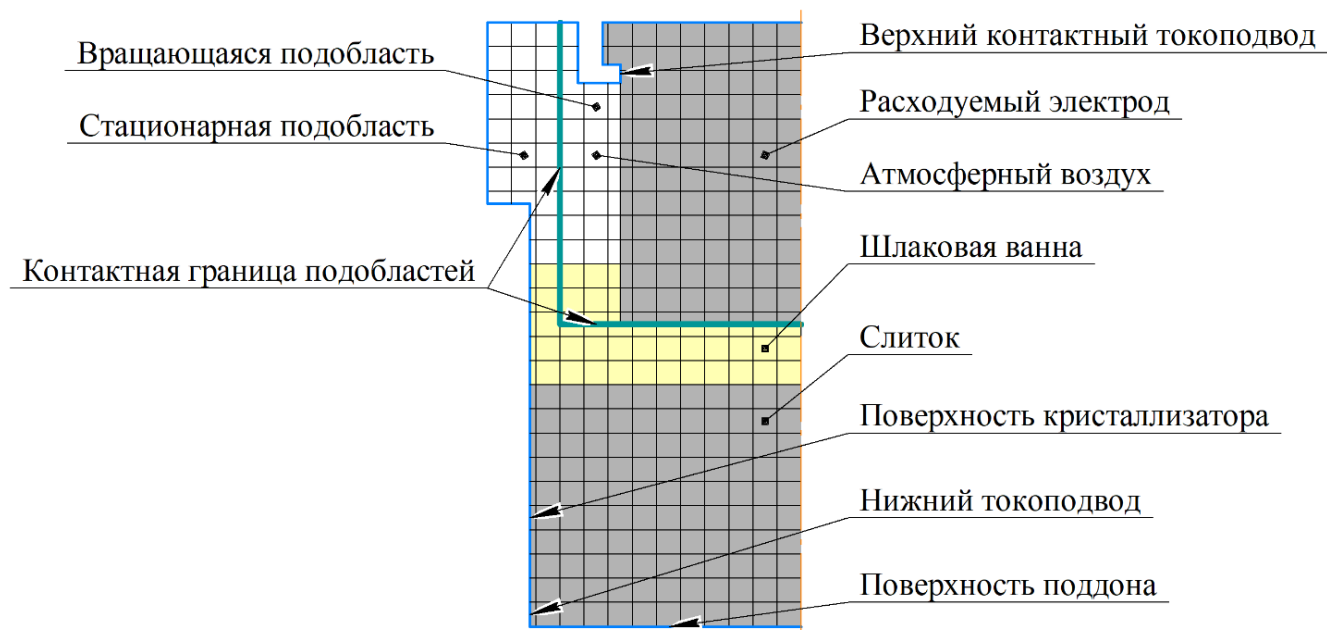


Рисунок 4 – Эскиз расчетной сетки

Деление расчетной сетки на две подобласти оправдано тем фактом, что передача вращательного движения телу РЭ через граничное условие невозможно, так как оно представлено в виде закристаллизовавшегося потока. Процесс кристаллизации/плавления осуществляется регулированием величины вектора скорости, который в закристаллизованном потоке приравнивается нулю. Следовательно, для передачи вращения необходимо вращать граничное условие, с которым напрямую контактирует тело РЭ. Интерфейс взаимодействия между подобластями расчетной сетки выделен жирной линией, пролегающей между телом РЭ, поверхностью ВК и объемом МВ, тем самым разделяя собой атмосферу печи и объем ШВ. Кроме того, расчетная сетка поделена на регионы инициализации, в которых помещены соответствующие фазы системы, и названиям которых они соответствуют. Процесс вращения тела расходуемого электрода начинается в момент итерационного процесса и заканчивается одновременно с его прекращением.

Далее приведены уравнения (23)-(27), в которых приведены граничные условия модели. Граничные условия для верхнего токоподвода имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \pm 46 \text{ В} \\ q = \lambda(T_0 - T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \\ p = 0 \text{ Па} \\ \sigma = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \lambda = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right., r = 0,03 \text{ м}, 1,5 \text{ м} < z < 1,51 \text{ м}, \quad (23)$$

где φ – электрический потенциал; q – удельная теплопроводность; p – избыточное давление; λ – коэффициент теплопроводности; σ – коэффициент электропроводности; T_0 – температура граничного условия текущая; T – температура среды, контактирующей с граничным условием; r – радиус тела РЭ; z – координата высоты.

Граничные условия нижнего токоподвода имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0 \text{ В} \\ q = \lambda(T_0 - T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \\ p = 0 \text{ Па} \\ \sigma = 55 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \lambda = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right., \quad (24)$$

$$R = 0,06 \text{ м}, -R < y < R \text{ м}, 0 < z < 0,05 \text{ м}, x = \sqrt{R^2 - y^2}, x < 0,$$

где R – радиус стенки ВК; x – координата длины; y – координата ширины.

Граничные условия поверхности поддона ВК имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0 \text{ В} \\ q = \lambda(T_0 - T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \\ p = 0 \text{ Па} \\ \sigma = 55 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \lambda = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right., R = 0,06 \text{ м}, -R < y < R, z = 0, x = \sqrt{R^2 - y^2} \quad (25)$$

Граничные условия поверхности стенки ВК имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0 \text{ В} \\ q = \lambda(T_0 - T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \\ p = 0 \text{ Па} \\ \sigma = 55 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \lambda = 400 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right., R = 0,06 \text{ м}, 0 < z < 0,56 \text{ м} \quad (26)$$

Граничные условия контактной поверхности с атмосферой имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0 \text{ В} \\ q = \lambda(T_0 - T) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \\ p = 0 \text{ Па} \\ \sigma = 0 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \lambda = 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right., 0,06 \text{ м} < R < 0,03, z > 0,56 \text{ м} \quad (27)$$

Далее приведены уравнения (28)-(33), в которых приведены начальные условия модели. Начальные условия для тела РЭ имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 300 \text{ К} \\ \alpha_{\text{сталь}} = 1 \\ \alpha_{\text{шлак}} = 0 \\ \alpha_{\text{воздух}} = 0 \\ \sigma = 4 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \varepsilon = 1,000023 \\ \rho = 7400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, r = 0,03 \text{ м}, -r < y < r, x = \sqrt{R^2 - y^2}, 0,01 \text{ м} < z < 1,56 \text{ м}, \\ \mu = 0,006 \text{ Па} \cdot \text{с} \\ c_p = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ k = 85 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \\ \lambda = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right. \quad (28)$$

где T – температура среды; α – объемная доля вещественной фазы; ε – магнитная проницаемость среды; ρ – плотность вещества; μ – динамическая вязкость

вещества; c_p – удельная теплоемкость среды; k – удельная (скрытая) теплота плавления (кристаллизации).

Начальные условия для шлаковой ванны имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 300 \text{ К} \\ \alpha_{\text{сталь}} = 0 \\ \alpha_{\text{шлак}} = 1 \\ \alpha_{\text{воздух}} = 0 \\ \sigma = 120 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \varepsilon = 0,999987 \\ \rho = 2400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, R = 0,06 \text{ м}, -R < y < R, x = \sqrt{R^2 - y^2}, 0 < z < 0,05 \text{ м}. \\ \mu = 0,06 \text{ Па} \cdot \text{с} \\ c_p = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ k = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \\ \lambda = 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right. \quad (29)$$

Начальные условия для атмосферы печи имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 300 \text{ К} \\ \alpha_{\text{сталь}} = 0 \\ \alpha_{\text{шлак}} = 0 \\ \alpha_{\text{воздух}} = 1 \\ \sigma = 0 \frac{\text{См}}{\text{м}} \\ \varepsilon = 1 \\ \rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, 0,06 \text{ м} < R < 0,03, z > 0,56 \text{ м}. \\ \mu = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \\ c_p = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ \lambda = 0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{array} \right. \quad (30)$$

Начальные условия для верхнего токоподвода имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \pm 46 \text{ В} \\ T = 300 \text{ К} \end{array} \right., r = 0,03 \text{ м}, 1,5 \text{ м} < z < 1,51 \text{ м} \quad (31)$$

Начальные условия для стенки ВК имеют вид:

$$\begin{cases} \varphi = 0 \text{ В} \\ T = 300 \text{ К} \end{cases}, R = 0,06 \text{ м}, 0 < z < 0,56 \text{ м} \quad (32)$$

Начальные условия для поддона ВК имеют вид:

$$\begin{cases} \varphi = 0 \text{ В} \\ T = 300 \text{ К} \end{cases}, R = 0,06 \text{ м}, -R < y < R, z = 0, x = \sqrt{R^2 - y^2} \quad (33)$$

Перечень используемых материалов с указанием их свойств представлены в таблице 1. Привязка материалов к граничным условиям и регионам численной модели представлена в таблице 2 [82-84].

Таблица 1 – Материалы численной модели

№ п/п	Параметр	Сталь 30ХМА	Шлак АНФ-6	Медь М1	Атмосферный воздух
1.	Удельная электропроводность, См/м	$4 \cdot 10^6$	120	$55 \cdot 10^6$	0
2.	Магнитная проницаемость	1,000023	0,999987	0,999994	1,00000038
3.	Плотность, кг/м ³	7400	2400	8900	1,2
4.	Динамическая вязкость, Па·с	0,006	0,06	—	0,000009
5.	Температура «солидус», К	1680	1420	—	—
6.	Температура «ликвидус», К	1730	1470	—	—
7.	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	460	1000	385	1000
8.	Удельная теплота плавления- кристаллизации, Дж/кг	85000	200000	—	—
9.	Удельная теплопроводность, Вт/м·К	25	0,25	400	0,025

Таблица 2 – Распределение материалов численной модели

№ п/п	Регион расчетной сетки	Материал
1.	Тело расходуемого электрода	Сталь 30ХМА
2.	Металлическая ванна	Расплав 30ХМА
3.	Шлаковая ванна	Шлак АНФ-6
4.	Водоохлаждаемый кристаллизатор	Медь М1
5.	Водоохлаждаемый поддон	
6.	Атмосфера печи	Атмосферный воздух

2.4. Результаты численного моделирования

Вышеописанный математический аппарат был переведен в программный код для работы на ЭВМ. При его реализации использовался язык C++ совместно с программной библиотекой OpenFOAM v2406. Код был отлажен на этапе тестирования и является корректным и работоспособным. В результате кодовой интерпретации математического аппарата был создан комплект программных решателей, которые использовали в качестве входных данных вышеописанную расчетную сетку с соответствующими граничными и начальными условиями [85, 86]. Далее приведены наборы снимков экрана, отражающие результаты численного моделирования в виде векторных и скалярных числовых полей основных характеристик (потоков) [87].

На рисунках 5а, 5б приведены числовые поля распределения температуры в подэлектродной зоне в период розжига и рабочего хода печи ЭШП на постоянном токе прямой и обратной полярности соответственно. Из диаграмм видно, что предельная температура достигает значения около 2200 °С, а температурный градиент направлен от оси подэлектродной зоны к ее периферии в радиальном направлении. Причем, распределение тепловых центров изменяется в зависимости от использования соответствующей полярности тока.

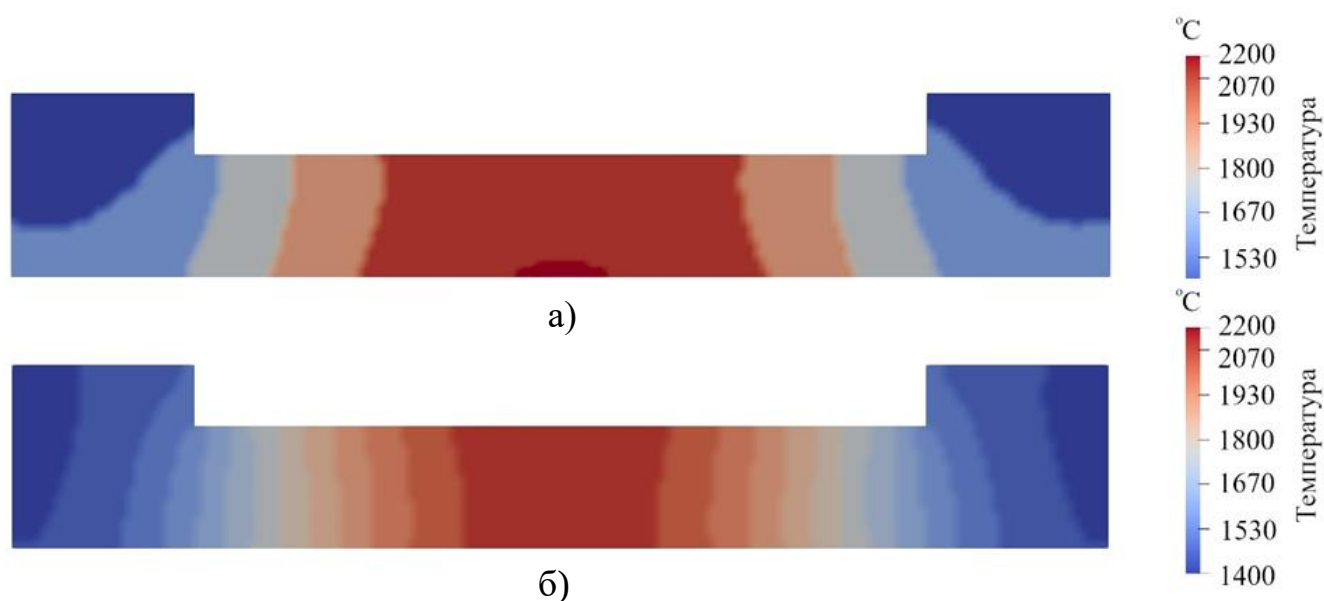


Рисунок 5 – Числовые поля температуры потока на постоянном токе прямой а) и обратной б) полярности

Рисунки 6а и 6б отображают поле распределения плотности тока прямой и обратной полярностей соответственно. Изображенная картина электрических явлений в части распределения тока соответствует описываемому математическому аппарату и не противоречит результатам проводимых натурных опытов. При прямой полярности наибольшая плотность тока наблюдается над поверхностью МВ, а при обратной – на торце тела РЭ.

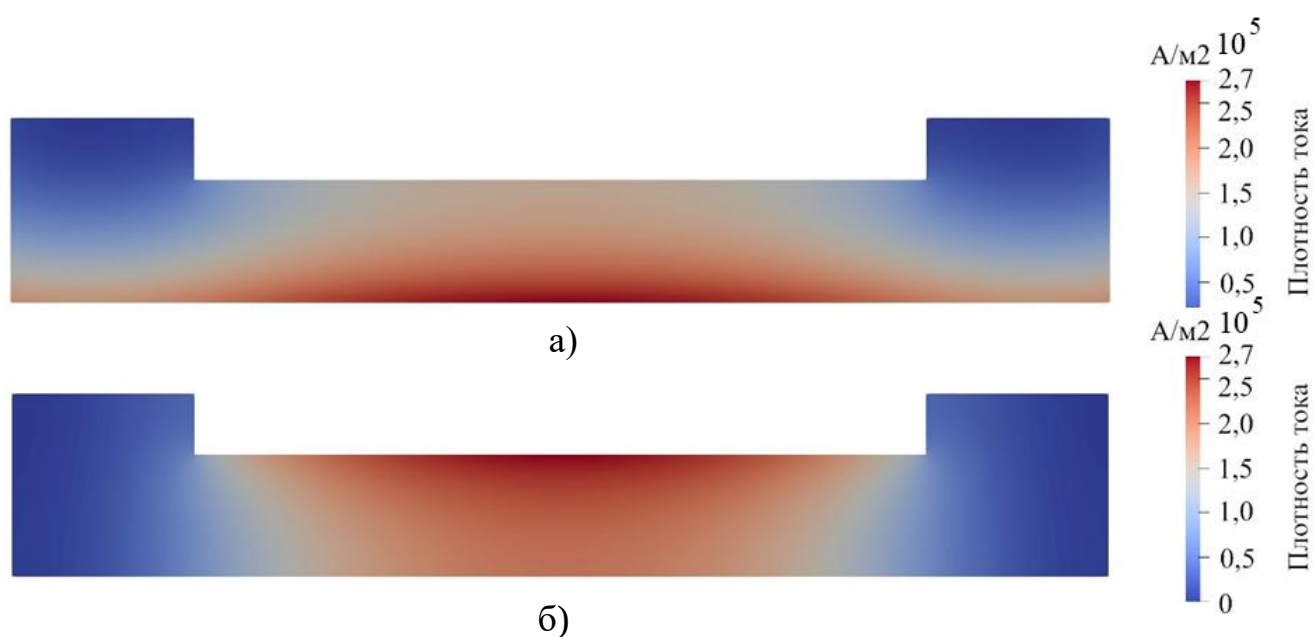


Рисунок 6 – Числовые поля плотности тока потока на постоянном токе прямой а) и обратной б) полярности

При наличии осевой симметрии в части расположения точек подключения токоведущих шин к ВК и РЭ отклонений в распределении плотности тока не наблюдается, и картина имеет осесимметричный вид. Предельная величина плотности тока не превышает 300000 А/м^3 , что не противоречит аналитическим расчетам.

Картина магнитных явлений [88, 89], протекающих в подэлектродной зоне печи ЭШП с несимметричным подключением основной токоведущей цепи в период рабочего хода изображена на рисунке 7. Рисунок 7 отображает распределение векторного поля магнитной самоиндукции постоянного тока в трехмерном представлении. Последствия несимметричности осевого подключения явно наблюдаются в искажении правильности цилиндрической формы поля магнитной самоиндукции, следующей за наибольшей плотностью тока в объеме ШВ, МВ и теле слитка в соответствии с описанием пинч-эффекта. Более наглядно это искажение демонстрируется на рисунке 8, отображающем векторное поле распределения силы Ампера в продольном сечении подэлектродной зоны. Здесь явно отражается эффект магнитного дутья, о чем свидетельствует отсутствие осевой симметрии в траектории распределения плотности тока, вслед за которой следует вектор силы Ампера, стараясь удержать его в неразрывном сжатом состоянии. Наибольшая плотность тока прослеживается по траектории, соответствующей наивысшему градиенту разности потенциалов, т.е. ток течет там, где разница потенциалов больше, а сопротивление среды меньше вследствие меньшего расстояния между проводниками с лучшей электропроводностью, чем у ШВ. Это также является следствием неравномерного распределения ферромагнитных масс в объеме МВ, ШВ и теле слитка, что опять же провоцируется неравномерностью теплового распределения в объеме ШВ и МВ в результате эффекта магнитного дутья. Возникновение несимметричности в поле распределения векторов силы Ампера напрямую влияет на процесс капельного переноса металла, вследствие чего фронт кристаллизации теряет осевую симметрию, а затем и поверхность МВ теряет радиальную симметрию в

поперечном сечении ВК, что провоцирует возникновение дефекта послойной кристаллизации слитка.

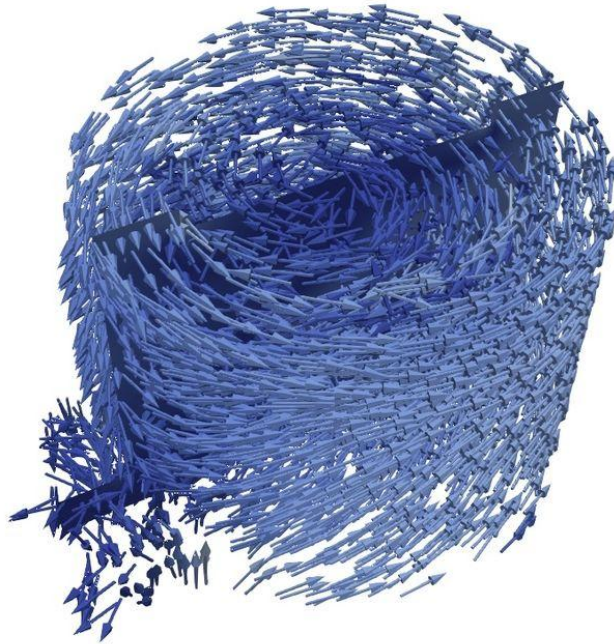


Рисунок 7 – Поле векторов магнитной индукции вокруг ШВ, МВ и тела слитка

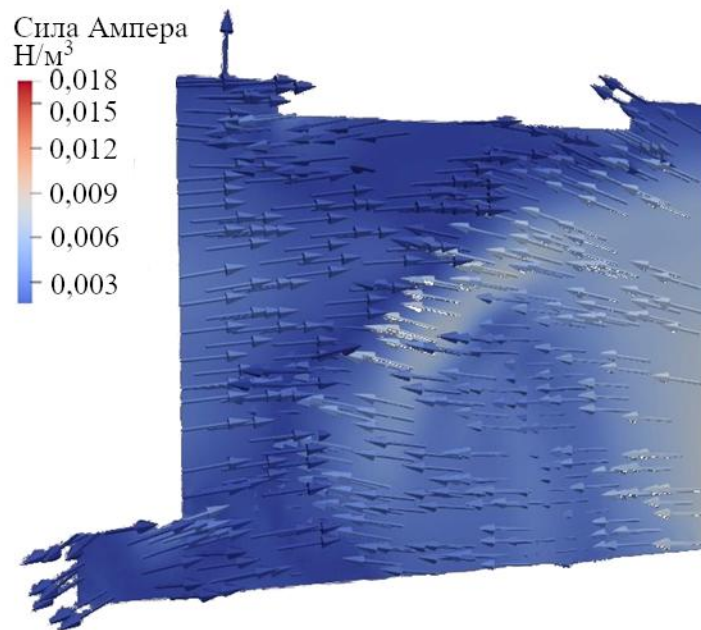


Рисунок 8 – Поле векторов силы Ампера в продольном сечении ВК при формировании слитка

На рисунке 9 приведено векторное поле плотности постоянного тока прямой полярности в продольном сечении слитка в течение установленного капельного

переноса металла по мере роста слитка. Видно, что направление движения тока не противоречит содержанию рисунка 4а. Расположение теплового центра искажено вследствие искривления траектории течения тока в результате эффекта магнитного дутья, что явно указано более ярким теплым цветом на диаграмме, свидетельствующем о росте абсолютного значения плотности тока. На рисунке 9 также явно виден «придасток» расчетной сетки, который был сделан намеренно с целью создания несимметричности подключения основной токоведущей цепи к телу ВК, причем плотность тока в этом «придатке» наивысшая, что не противоречит действительности, однако перегрева в нем не наблюдается из-за повышенной электропроводности меди, из которой изготовлено тело ВП.

На рисунке 10 приведена диаграмма распределения температур в поперечном сечении шлаковой ванны в поперечном сечении вблизи поверхности металлической ванны [90]. Температура шлаковой ванны не отражается для лучшей цветовой контрастности траектории.

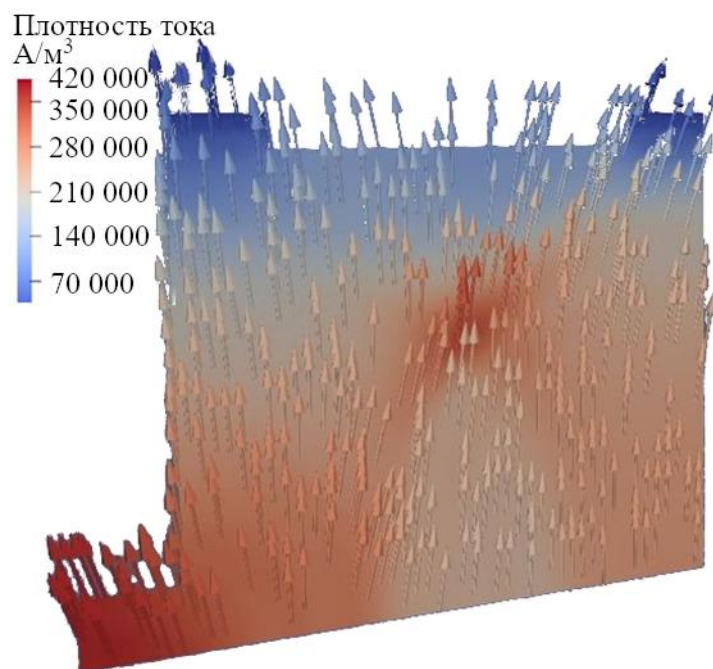


Рисунок 9 – Поле векторов плотности тока в продольном сечении ВК при формировании слитка

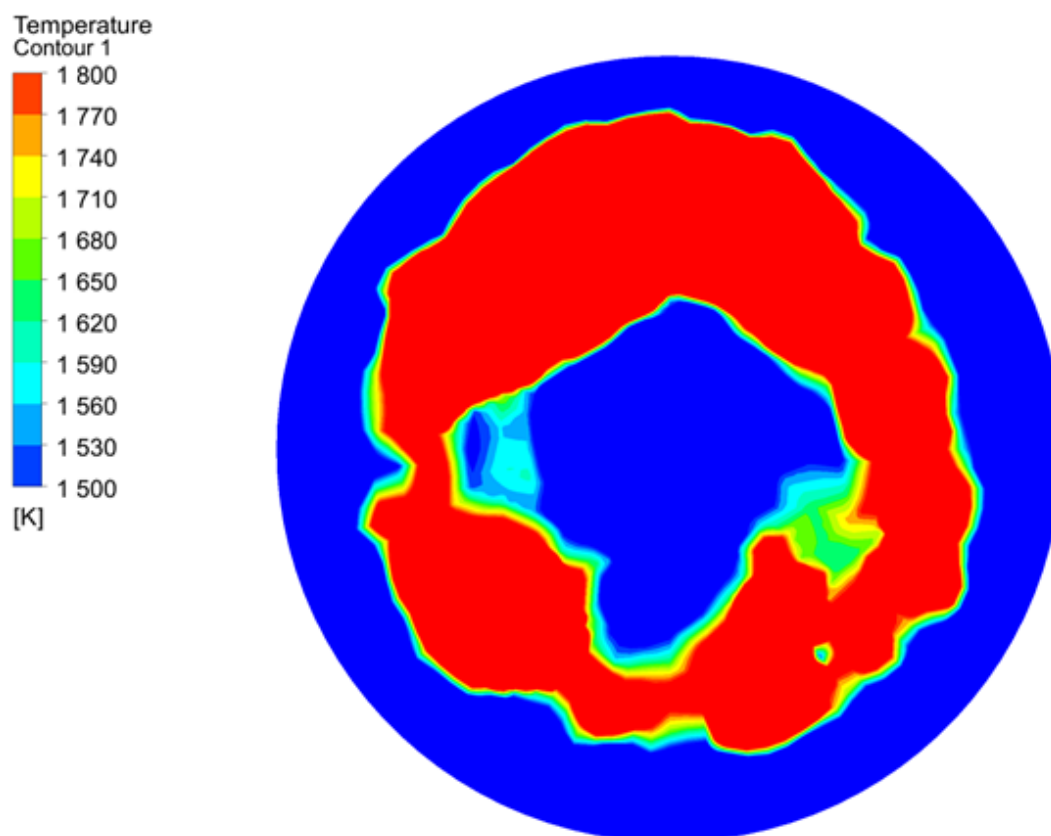


Рисунок 10 – Траектория падения капель в объеме шлаковой ванны

Из рисунка 10 видно, что траектория падения капель металла имеет форму близкую к форме окружности, что явно свидетельствует об изменении траектории падения капель на периферии шлаковой ванны. Несмотря на постоянство скорости вращения расходуемого электрода траектория падения капель непостоянна в радиальном измерении и находится в интервале 40-50 мм от диаметра РЭ. Данное приращение составляет около 70 % от номинального диаметра РЭ. При изменении скорости вращения расходуемого электрода между 60 и 90 об/мин существенных отличий не было зафиксировано, что является следствием влияния изменения размера капли и вязкости шлака: импульс массивной капли соразмерен с импульсом измельченной капли с большей тангенциальной скоростью.

На рисунке 11 изображены диаграммы числовых полей температуры в продольном сечении металлической ванны. Данные числовые поля ограничены малым диапазоном температуры со значениями вблизи температуры солидус для стали [87].

На рисунке 11а) видно, что при использовании скорости вращения расходуемого электрода 60 об/мин форма фронта кристаллизации близка к плоской форме с малой выгнутостью периферийного кольцевого мениска. При использовании скорости 90 об/мин вогнутость формы фронта кристаллизации, изображенной на рисунке 11б), более явная, причем его центральная часть приподнята приблизительно на 10 мм по сравнению с предыдущим режимом вращения. Следствием этого является повышенная интенсивность конвективных потоков, направленных от периферии к центру шлаковой и металлической ванн.

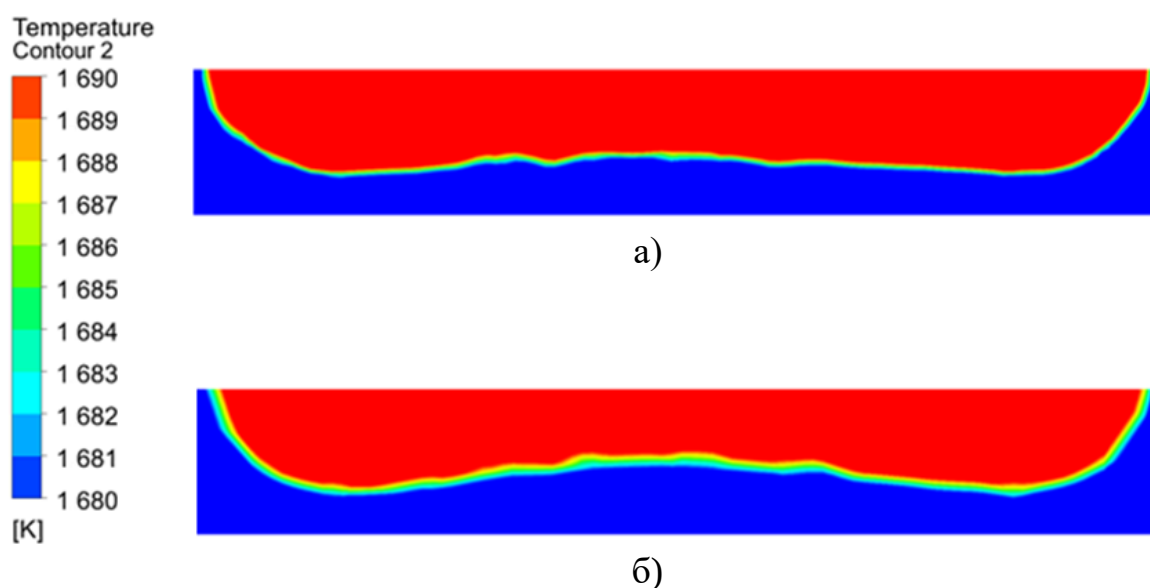


Рисунок 11 – Форма фронта кристаллизации: а) – для скорости вращения 60 об/мин; б) – для скорости вращения 90 об/мин

2.5. Вывод эмпирической формулы допустимой скорости вращения расходуемого электрода

При рассмотрении проблемы обеспечения управления формой траектории падения капель на поверхность МВ необходимо рассмотреть все существующие значимые силы, которые влияют на процесс формообразования капель металла, а также их движение сквозь объем ШВ, при вращении тела РЭ. Практическим решением данной проблемы является математическое уравнение, позволяющее рассчитать необходимую величину скорости вращения тела РЭ для компенсации возмущающего воздействия переменной величины, а именно – силы Ампера. На рисунке 12 приведена схема, отображающая наиболее значимые силы,

воздействующие на капли металла. Под значимыми подразумеваются те силы, которые непосредственно оказывают влияние на ее траекторию. Среди них находятся: сила тяжести, центробежная сила, Архимедова сила, сила поверхностного натяжения, сила межфазного трения-скольжения, сила Ампера. Отсутствие возможности точно предсказывать направленность силы Ампера в каждый момент времени явно указывается наличием нескольких разнонаправленных векторов, которые относятся к данной силе и заключены внутри малой пунктирной окружности. Длины векторов не отображают действительного взаимного соотношения сил по абсолютной величине и указаны только с учетом предполагаемой направленности.

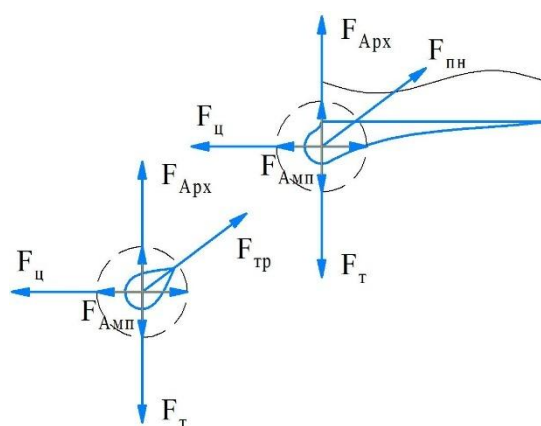


Рисунок 12 – Воздействие сил на капли металла вблизи торца тела РЭ: $F_{ц}$ – сила центробежная; $F_{Арх}$ – сила Архимеда; $F_{Амп}$ – сила Ампера; $F_{тр}$ – сила межфазного трения; $F_{т}$ – сила тяжести; $F_{пн}$ – сила поверхностного натяжения

Учитывая результаты численного моделирования, можно сказать, что сила Ампера, оказывает наибольшее воздействие на каплю металла, пока та является частью металлической пленки на торце тела РЭ, а также пока она находится в непосредственной близости от него. По мере удаления капли от тела РЭ сила Ампера перестает оказывать негативное воздействие на изменение формы траектории движения капли сквозь объем ШВ. В случае, если капля становится кратковременным мостиком тока, то сила Ампера оказывается направлена исключительно к геометрическому центру капли, что является следствием проявления пинч-эффекта. Кроме того, пинч-эффект действует не только на саму каплю, но и на весь поток заряженных частиц, который движется по

новообразованному благодаря капле металла мостику тока, что явно отображается на диаграммах числовых полей как кратковременный локальный всплеск плотности тока.

Среди сил, которые оказывают непосредственное воздействие на горизонтальную составляющую результирующей силы, находятся центробежная сила, сила поверхностного натяжения, сила межфазного трения и сила Ампера. Сила Архимеда и сила тяжести не изменяют своего направления и при проецировании на горизонтальную плоскость обнуляются, однако их величина может непосредственно влиять на продолжительность нахождения капли в объеме ШВ. При рассмотрении проблемы нахождения результирующей силы в трехмерном представлении сила Архимеда и сила тяжести непосредственно вносят свой вклад в формирование результирующей силы по принципу суперпозиции, но рассматривать их стоит только в качестве лимитирующего фактора при нахождении верхнего предела скорости вращения тела РЭ, особенно при учете того факта, что вязкостные свойства среды и плотности компонентов межфазной системы при нахождении в жидком агрегатном состоянии изменяются незначительно. Аналогичный вывод можно сделать и относительно силы межфазного трения-скольжения и силы поверхностного натяжения. Несмотря на то, что они имеют проекцию на горизонтальную плоскость, сила поверхностного натяжения не оказывает противодействия эффекту магнитного дутья, но только выступает противосилой к центробежной силе при наличии вращения тела РЭ или к силе тяжести при его отсутствии. Сила межфазного трения-скольжения явно выступает демпфером результирующей силы и всегда направлена предельно соосно с ней, но в обратном направлении.

Таким образом, среди наиболее значимых сил при определении допустимой скорости вращения тела РЭ остаются только центробежная сила и сила Ампера, направленность которых может как совпадать, так и нет. При переносе задачи из трехмерного пространства в двухмерное в горизонтальном сечении слитка необходимо обеспечить такие условия при вращении тела РЭ, при которых

горизонтальная проекция равнодействующей силы была всегда направлена от центра тела формируемого слитка к его периферии, что преимущественно обеспечивается гарантированным преобладанием величины вектора центробежной силы над вектором силы Ампера, причем центробежная сила должна соответственно пропорционально изменяться вместе с силой Ампера.

В предыдущих разделах решение задачи осуществлялось с применением численного моделирования при решении задач в частных производных при описании задачи в дифференциальном виде ввиду ее комплексности. Здесь же необходимо представить упрощенную линейную форму ее решения, которая не может быть решена в первом приближении без результатов численного моделирования. С учетом предыдущих высказываний можно заключить, что должно выполняться неравенство вида:

$$F_{\text{ц}} > F_{\text{Амп}}. \quad (34)$$

Преобразовав это неравенство путем раскрытия его основных членов, получим:

$$m_{\text{к}} a_{\text{ц}} > BIl, \quad (35)$$

где I – ток в основной токоведущей цепи; B – магнитная индукция; l – длина капли, эквивалентная ее диаметру $d_{\text{к}}$; $m_{\text{к}}$ – масса капли металла; $a_{\text{ц}}$ – центробежное ускорение.

С учетом положений:

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 R_{\text{эл}} \quad (36)$$

и

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (37)$$

где ω – скорость вращения тела РЭ; $R_{\text{эл}}$ – радиус тела РЭ; n – количество оборотов тела РЭ в минуту, можно преобразовать (36) к виду:

$$m_{\text{к}} \omega^2 R_{\text{эл}} > BIl, \quad (38)$$

а затем к:

$$n > 9,55 \sqrt{\frac{B I d_k}{m_k R_{эл}}}, \quad (39)$$

Произведя минимизацию наличия невычислимых компонентов путем их алгебраического преобразования, к которым относится масса капли, через ее плотность и диаметр, можно преобразовать (39) к виду:

$$n > \frac{13,18}{d_k} \sqrt{\frac{B I}{\rho_k R_{эл}}}. \quad (40)$$

Размер капли непосредственно зависит от величины силы, которая стремится сорвать ее с поверхности пленки металла, но также он зависит и от величины коэффициента поверхностного натяжения. Если гравитационное поле сил, в которое не входит сила тяжести, слабо, то капля будет формироваться с наибольшим объемом. Иначе, наличие сил, подобных центробежной силе и силе Ампера, будет стремиться измельчить каплю. Явно указав на это, можно преобразовать уравнение (40) к виду, где диаметр капли заменен на силу поверхностного натяжения, которая нам известна при пересчете на коэффициент поверхностного натяжения и периметр контактной границы капли с пленкой металла. Если принять, что периметр контактной границы равен длине окружности капли, то получим следующее уравнение:

$$n > 2,62 F_{пн} \sqrt{\frac{B I}{\rho_k R_{эл}}}. \quad (41)$$

Сила поверхностного натяжения и магнитная индукция – компоненты, которые нельзя измерить непосредственно. При условии, что с увеличением тока будет увеличиваться и величина магнитной индукции, а соответственно и усилится эффект магнитного дутья, то для его ликвидации будет непосредственно прикладываться центробежная сила. Возникает обратно пропорциональная зависимость, в которой для сохранения величины и направленности вектора суперпозиции сил при увеличении магнитной индукции будет уменьшаться сила поверхностного натяжения. На основании этого можно сделать предположение,

что указанная зависимость всегда будет стремиться к какой-то конкретной постоянной величине, которую можно выразить в качестве поправочного коэффициента k . С учетом поправочного коэффициента уравнение (41) примет вид:

$$n > k \sqrt{\frac{I}{\rho_k R_{эл}}}. \quad (42)$$

На основании полученных сведений от численной модели можно принять величину поправочного коэффициента для ЭШП на постоянном токе прямой полярности, равную $k = 22$. Для ЭШП на постоянном токе обратной полярности значение поправочного коэффициента равно 1, т.е. он не применяется.

Выводы по главе 2

Для решения поставленной комплексной задачи стабилизации формы фронта кристаллизации при ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ была сформирована гипотеза об эволюции формы МВ и торца РЭ по мере наращивания тела заготовки. Было высказано предположение о поведении поверхности фронта кристаллизации во времени на постоянном токе, описывающее его изменчивость и направленность траектории падения капель по эллипсообразной траектории в поперечном сечении объема ШВ. Коррекция эллипсности траектории падения капель металла достигается наложением поля центробежной силы, возникающей при прикладывании вращательного движения к телу РЭ. В результате достигается изменение формы фронта кристаллизации приведением ее к радиальной симметрии и уменьшение формы мениска МВ, что является результатом одновременного подъема и равномерного распределения теплоты в объеме ШВ.

Моделирование предложенной концепции технологии ЭШП с вращением РЭ было осуществлено численными методами в рамках вычислительной гидродинамики, т.е. ньютоновской механики. Дано описание комплексной расчетной сетки, состоящей из двух подобластей, граничных и начальных условий, а также физических свойств задействованных материалов. Математический

аппарат модели описывает совместное использование электромагнитных явлений, течения многофазного потока и тепловые явления.

В результате моделирования были получены числовые поля, отображающие течение тока внутри объема ШВ, направленность силы Ампера при искажении однородности магнитного поля, траектория падения капель металла и форма фронта кристаллизации МВ. Кроме этого, были проведены расчеты эмпирической формулы для определения допустимых соответственных диаметральных размеров РЭ и ВК и скоростей вращения. Согласно проведенным расчетам, при использовании флюса АНФ-6 минимальная допустимая скорость вращения должна определяться с использованием поправочного коэффициента, равному 22, а средний диаметр гарантированно круговой формы траектории падения капель металла в 1,7 раз больше диаметра тела РЭ. На основании полученного результата можно судить о том, что эффективное применение ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ на флюсе АНФ-6 с коэффициентом заполняемости, близким к единице, маловероятно.

ГЛАВА 3. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Подготовка материальной базы

Для проведения натурального эксперимента осуществлена существенная доработка действующей печи ЭШП А-550 в электрической и механической частях [91]. Модернизация электрической части печи включила в себя дооснащение автоматическим приводом подачи расходуемого электрода и подключение тиристорного выпрямителя, представляющего собой двухполупериодный диодный мост и обеспечивающего выпрямленную диаграмму тока. Управление двигателями вращения и подачи расходуемого электрода осуществляется непосредственно с помощью программируемого логического контроллера на основе показаний тока и напряжения в основной токоведущей цепи печи. Управление токовыми характеристиками выпрямленного тока осуществляется тиристорами под управлением блока фазоимпульсного управления [92]. Принципиальная электрическая схема полупромышленной печи ЭШП А-550 изображена на рисунке 13.

Система электропитания содержит в себе следующие компоненты: регулятор тока с однофазным трансформатором (Т), управляемым выпрямителем (УВ), блоком фазоимпульсного управления (БФИУ), сглаживающим фильтром (СФ), обратной связью по току $I_{o.c}$, снимаемой с резистивного шунта $R_{ш}$, установленного в цепи питания печи, управляющим программируемым логическим контроллером (ПЛК) и сенсорной панелью оператора (ПО). Для поддержания стабильности работы печи ЭШП в необходимом технологическом режиме необходима автоматизация работы основных ее элементов. Полупромышленная печь ЭШП А-550 должна быть оборудована автоматизированной системой управления, позволяющей производить включение/отключение подачи электроэнергии в основную цепь печи, управлять вертикальной подачей расходуемого электрода с регулировкой скорости в автоматическом и ручном режимах, осуществлять вращение расходуемого электрода с заданной скоростью, выполнять аварийный останов печи. Согласно

функциональной схеме автоматизированная система управления должна включать в себя: регулятор напряжения шлаковой ванны, построенный на базе привода подачи электрода, содержащего передаточный механизм (М), асинхронный короткозамкнутый двигатель (АД), транзисторный преобразователь частоты (ПЧ), управляющий программируемый логический контроллер (ПЛК), на вход которого поступает сигнал обратной связи $U_{o.c.}$ и сенсорную панель оператора (ПО).

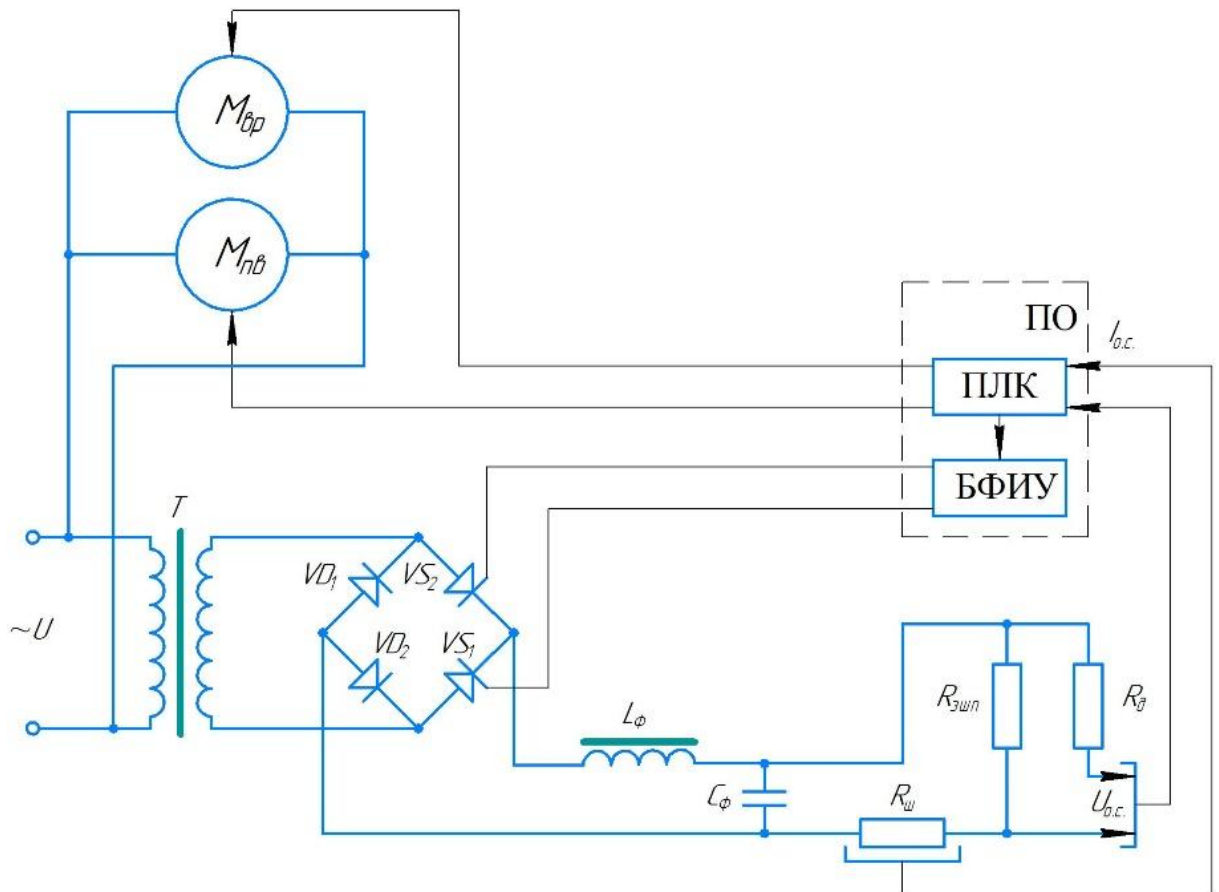


Рисунок 13 – Принципиальная электрическая схема полупромышленной печи ЭШП А-550

В результате проведения пусконаладочных плавов был осуществлен замер формы сигнала с помощью цифрового осциллографа с функцией фотофиксации графического представления сигнала. С помощью данного осциллографа была зафиксирована форма напряжения в основной токоведущей сети во время работы печи. Щупы устанавливались на контактных щетках и поддоне ВК в параллель

основной токоведущей цепи. Результат измерения формы напряжения при работе печи на постоянном токе представлен на рисунке 14.

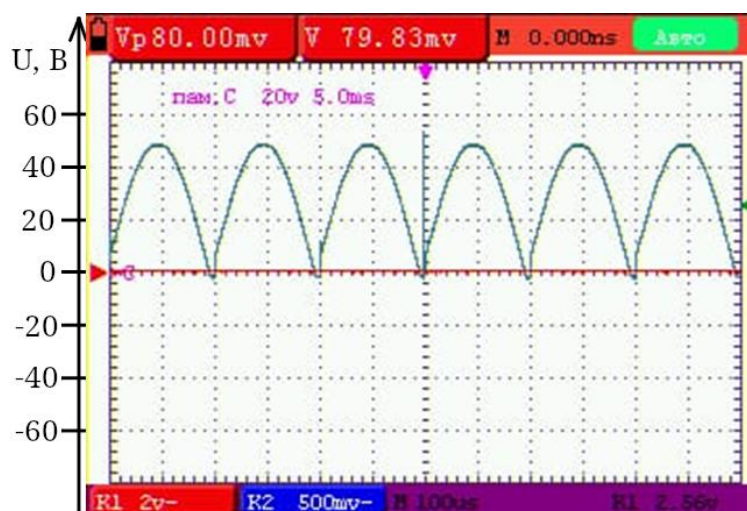


Рисунок 14 – Форма напряжения основной токоведущей цепи

Представленные выше сведения явно указывают на наличие полного выпрямления тока в токоведущей цепи, что не было достигнуто в ранних исследованиях и составляет прикладную новизну данного исследования. По рисунку 14 можно зафиксировать величину напряжения холостого хода печи, которое равно около 54 В.

Модернизация механической части печи заключалась в дооснащении несущей каретки механизмом вращения расходуемого электрода [93]. В результате чего конструкция каретки претерпела конструктивные изменения в части фиксации тела РЭ на ней, осуществлении контактного токоподвода и вращательного момента телу РЭ. На рисунке 15 представлена принципиальная кинематическая схема модернизированной печи ЭШП А-550. До модернизации печь была оснащена приводом вертикальной подачи несущей каретки, который осуществлял преобразование вращательного движения электродвигателя в поступательное движение через червячную передачу. Нами была изменена конструкция несущей каретки для установки на ее корпусе асинхронного электродвигателя, зубчатой передачи и трехкулачкового патрона. Согласно рисунку 15 вращательное движение

телу РЭ, зажатому в трехкулачковом патроне, передается через прямозубую цилиндрическую понижающую передачу от асинхронного электродвигателя.

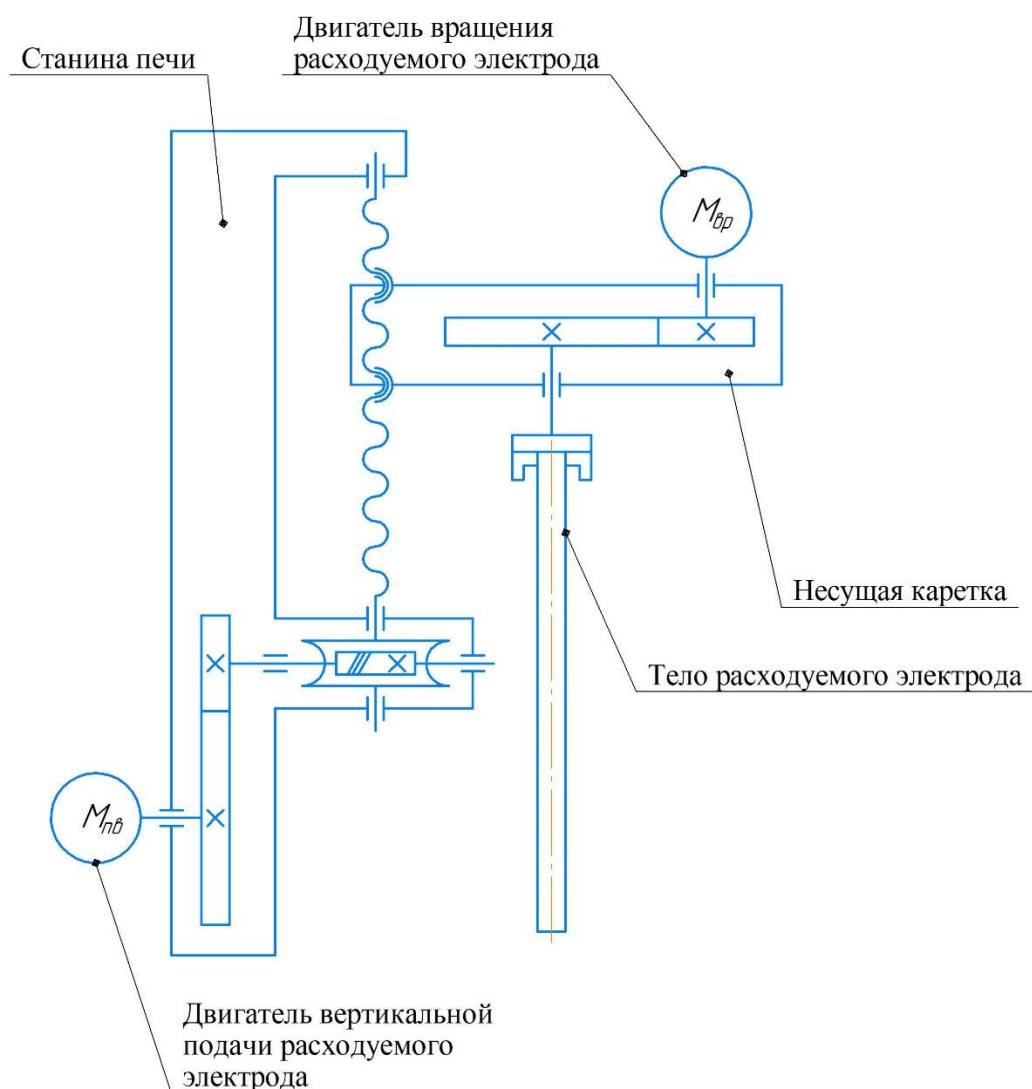


Рисунок 15 – Принципиальная кинематическая схема печи ЭСП А-550

По плану эксперимента было осуществлено 30 плавов, разделенных на 6 условных групп. В качестве рабочего флюса во всех плавках использовался первичный флюс марки АНФ-6, подверженный предварительной прокалке не менее 12 часов. Тела расходуемых электродов были изготовлены из стали марки 30ХМА. Конструкция тел РЭ была составной, в которой переплавная часть была предварительно механически обработана и откалибрована, а затем концентрически приварена к хвостовику. Диаметр переплавляемой части равен 60 мм, длина равна 580 ± 20 мм. Переплавляемые части изготавливались отдельными партиями под

отдельную серию плавков. Диаметр хвостовика равен 40 мм, длина хвостовика равна 1000 мм. Плавка осуществлялась в медный ВК с несимметрично подключенным ВП диаметром 120 мм и высотой 560 мм. Первые 2 группы плавков, т.е. все плавки на переменном токе, осуществлялись в водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 90 мм и высотой 500 мм. Охлаждающие рубашки ВК и ВП заполняются проточной водой под давлением, обеспечиваемым электрическим центробежным насосом с расходом 25 м³/ч.

Подключение тела расходуемого электрода к основной токоведущей цепи осуществлялось путем его закрепления в трехкулачковом патроне, закрепленный на подвижной каретке с вертикальной подачей, через пару меднографитовых подвижных контактных щеток, образующих с телом расходуемого электрода пару «трение скольжения». Место непосредственного контакта щеток и тела РЭ шлифуется наждачной бумагой при вращении зафиксированного тела РЭ вхолостую в случае, если на ней образуется коррозия. Вращательное движение телу расходуемого электрода передавалось от асинхронного двигателя через зубчатую передачу, закрепленными на ранее упомянутой подвижной каретке. Настройка скорости вращения двигателя осуществлялась через частотный преобразователь перед началом каждой плавки и в ходе нее не изменялась.

Конвертирование переменного тока в постоянный осуществлялось с помощью подключения двухполупериодного диодного моста к однофазной электрической цепи, что обеспечивает полное выпрямление тока. Переключение полярности осуществлялось взаимным переприсоединением токоведущих шин водоохлаждаемого поддона и контактных щеток на контактной группе понижающего трансформатора.

Фиксация сведений о потреблении электрической энергии осуществлялась с помощью трехфазного электрического счетчика, подключенного в основную электрическую цепь печи. Снятие показаний потребления тока осуществлялось с помощью трансформаторов-токосъемников, установленных пофазно.

3.2. Ход и режимы ведения плавки

Начало плавки осуществляется на твердом старте с применением порошка алюминиево-магниевого марки ПАМ-1 в соотношении 1 к 100 относительно массы флюса. Далее наводится МВ и прогревается ШВ в течение 10 минут с постепенным повышением тока в пределах 1000 А в ручном режиме. При достижении минимальных колебаний тока осуществляется переход в автоматический режим плавки и включается вращение тела РЭ при необходимости для данной плавки. Процесс вращения тела РЭ не прекращается на протяжении всего рабочего хода печи до начала процесса выведения усадочной раковины. Выведение усадочной раковины осуществляется плавным ступенчатым понижением тока по 200 А ежеминутно до значения около 300-500 А в течение 5 минут. После отключения основной токоведущей цепи тело РЭ извлекается из внутренней полости ВК, а сформированная заготовка выдерживается не менее 40 минут без отключения водяного охлаждения ВК и ВП.

Токовый режим на всех плавках одинаков и составляет 1500 А и 46 В на основном ходу плавки согласно показаниям приборов панели оператора. На всем периоде плавки осуществляется фиксация температуры на выходе из охлаждающих рубашек ВК и ВП, а также на поверхности касания контактных щеток к телу РЭ и местах крепления шин основной токоведущей цепи к щеткам с помощью оптического пирометра. Предельные значения температур для воды находятся в диапазоне 30-35 °С, для щеток – 500-550 °С, для шин – 40-50 °С. При ЭШП на постоянном токе осуществлялась фиксация температуры диодов, которая находилась в диапазоне 80-90 °С [94].

Общие сведения о технологических параметрах экспериментальных плавки приведены в сводной таблице 3.

Таблица 3 – Технологические параметры экспериментальных переплавов

№ ЭШП	№ группы	Род тока	Направление тока	Скорость вращения тела расходуемого электрода, об/мин	Принятое условное обозначение
1-5	1	переменный	-	-	ПТ
6-10	2			60	ПТ ВРЭ
11-15	3	постоянный	Прямая полярность	-	ПТПП
16-20	4			60	ПТПП ВРЭ
21-25	5		Обратная полярность	-	ПТОП
26-30	6			60	ПТОП ВРЭ

3.3. Подготовка образцов

Выплавленные заготовки подвергались термообработке перед их дальнейшей механической обработкой. Заготовки отпускались в муфельной печи при температуре 700 °С в течение четырех часов [95]. Фотографии полученных заготовок изображены на рисунках 16 и 17.

Вырезка продольных темплетов осуществлялась на ленточнопильном полуавтомате. Схема механической обработки заготовок изображена на рисунке 18. Поверхность продольных темплетов заготовок полировалась до уровня шероховатости не менее Ra 1,6, а затем протравливалась 5% раствором азотной кислоты для последующего макроанализа структуры и определения направленности роста ветвей дендритов и изменения формы фронта кристаллизации по мере формирования тела слитка.



Рисунок 16 – Внешний вид полученных слитков ЭШП на переменном токе



Рисунок 17 – Внешний вид полученных слитков ЭШП на постоянном токе

Также с тела каждого темплета были сняты образцы стружки для анализа концентрации газов O_2 , H_2 и N_2 . Фотографии некоторых протравленных темплетов изображены в приложении А.

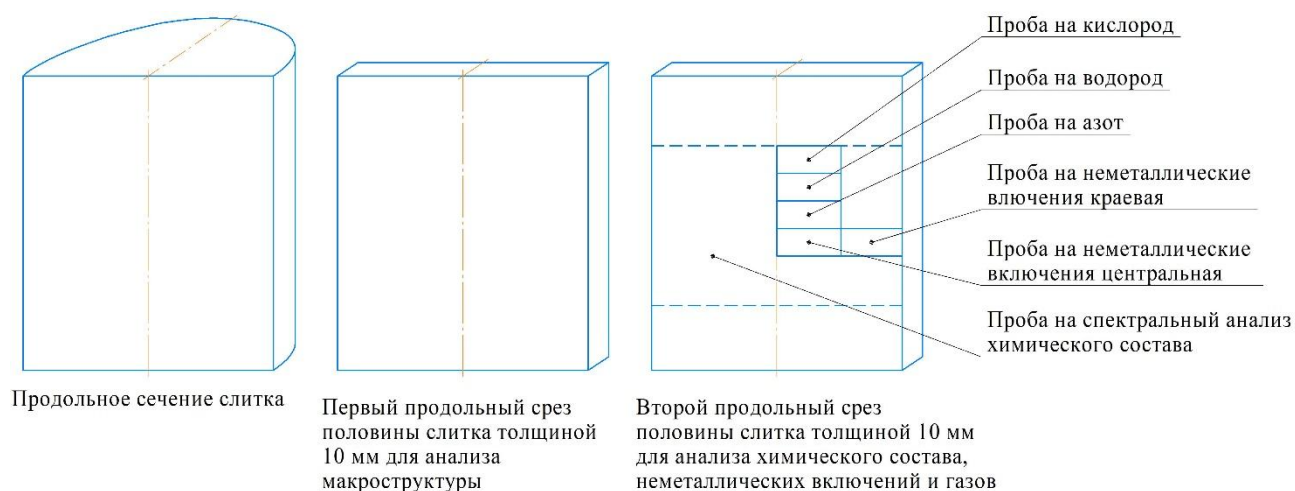


Рисунок 18 – Схема механической обработки образцов и вырезания темплетов

Выводы по главе 3

Осуществлению натурного эксперимента предшествовала модернизация существующей печи ЭШП А-550. Были разработаны принципиальные кинематическая и электрическая схемы. Кинематика печи была изменена в части внедрения механизма передачи вращательного движения телу РЭ от асинхронного двигателя. Крепление электрода к подвижной каретке было дополнено трехкулачковым самоцентрирующимся патроном. Подвод электричества к телу РЭ осуществляется через подвижные меднографитовые щетки.

В ходе плавки было выполнено 30 заготовок в 6 отличных друг от друга технологических режимах, однако геометрические размеры тел РЭ и ВК были неизменными во всех плавках.

Полученные заготовки были подвержены отпуску и механической обработке на ленточнопильном станке для последующего получения образцов. Были подготовлены образцы для спектрального анализа химического состава заготовок и анализа концентрации газов в металле [H], [O], [N]. Кроме того, для последующего анализа влияния технологических режимов на макроструктуру заготовок осуществлялось травление продольных темплетов для некоторых слитков из каждой плавильной группы.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

4.1. Спектральный анализ химического состава и концентрации вредных примесей в полученных слитках

Результаты спектрального анализа химического состава заготовок по категориям плавок представлены в таблице 4. В таблице 5 указан химический состав исходного металла. При сравнении значений таблицы 5 с требованиями [96] видно, что исходный металл полностью соответствовал требованиям по химическому составу, предъявляемым к стали марки 30ХМА. Допустимые пределы концентрации химических компонентов по ГОСТ 4543-2016 представлены в таблице 6. Группы плавок следует читать следующим образом: I – ЭШП на переменном токе; II – ЭШП на переменном токе с вращением РЭ; III – ЭШП на постоянном токе прямой полярности; IV – ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением РЭ; V – ЭШП на постоянном токе обратной полярности; VI – ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением РЭ.

При первичном осмотре химического состава образцов обратим внимание на концентрацию ВП в виде фосфора и серы. По сравнению с исходным металлом во всех образцах заготовок концентрация фосфора увеличилась, а серы упала, причем превышений требований ГОСТ 4543-2016 по этим компонентам не наблюдается. Фосфор увеличился во всех образцах приблизительно на 50 % от исходной концентрации. В отдельных случаях концентрация достигает 0,014 % и 0,016 %, в связи с чем можно сказать, что изменение токового режима и наличия вращения РЭ не влияет на концентрацию фосфора при сравнении с традиционной технологией ЭШП.

Заметны отличия в части десульфурации металла. Наиболее активная десульфурация наблюдается у образцов на постоянном токе обратной полярности, причем при отсутствии вращения тела РЭ средняя концентрация серы по слитку составляет 0,006 %, а с вращением РЭ – 0,005 %. Данная численная разница позволяет судить об отсутствии значительного влияния вращения тела РЭ на десульфурацию металла.

Таблица 4 – Химический состав полученных заготовок

Группа плавок	Массовая доля элементов, %													
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	W	V	Ti	Al	Co
I (ПТ)	0,29	0,58	0,30	0,015	0,008	0,11	0,90	0,20	0,16	<0,02	<0,005	0,001	<0,005	0,028
II (ПТ ВРЭ)	0,30	0,53	0,28	0,015	0,006	0,12	0,90	0,20	0,16			0,001	0,009	
III (ПТШ)	0,29	0,45	0,26	0,015	0,010	0,12	0,83	0,19	0,15			0,001	0,099	
IV (ПТШ ВРЭ)	0,30	0,42	0,26	0,014	0,010	0,12	0,84	0,20	0,15			0,001	0,077	
V (ПТОП)	0,29	0,5	0,23	0,016	0,006	0,12	0,88	0,19	0,16			0,001	<0,005	
VI (ПТОП ВРЭ)	0,30	0,47	0,20	0,015	0,005	0,12	0,90	0,20	0,16			0,001	0,008	

Таблица 5 – Химический состав исходного металла

Массовая доля элементов, %													
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	W	V	Ti	Al	Co
0,27	0,66	0,35	0,010	0,014	0,12	1,04	0,22	0,16	0,02	0,01	0,01	0,01	-

Таблица 6 – Химический состав стали марки 30ХМА ГОСТ 4543-2016

Массовая доля элементов, %													
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	W	V	Ti	Al	Co
0,26-0,33	0,40-0,70	0,17-0,37	He более 0,025	He более 0,025	He более 0,30	0,80-1,10	He более 0,30	0,15-0,25	He более 0,20	He более 0,05	He более 0,03	-	-

Самые высокие значения концентрации серы наблюдаются при ЭШП на постоянном токе прямой полярности порядка 0,010 %. Десульфурация при ЭШП на переменном токе дает средние показатели концентрации серы порядка 0,008 % при отсутствии вращения РЭ и 0,006 % при использовании вращения РЭ. Таким образом, можно судить о повышении десульфурующей способности ЭШП на переменном токе при использовании вращения РЭ вплоть до предельных значений, замеченных при ЭШП на постоянном токе обратной полярности.

Концентрация первичных легирующих компонентов в виде марганца и кремния имеет отличия от химического состава электродного металла. Постоянный ток прямой полярности снизил концентрацию марганца в среднем на 32 % от концентрации в электродном металле. Постоянный ток обратной полярности снизил концентрацию марганца в среднем на 24 %. Наиболее значительное снижение концентрации кремния в 43 % наблюдается на прямом токе обратной полярности с вращением тела расходуемого электрода. Снижение концентрации марганца и кремния является ожидаемым эффектом ввиду их повышенного сродства к кислороду по сравнению с железом.

Весомых изменений в концентрации никеля, меди, молибдена, вольфрама, ванадия и титана не наблюдается. Концентрации этих компонентов в полученных заготовках соответствуют требованиям ГОСТ 4543-2016 и колеблются в пределах измерительной погрешности. Стабильное отличие от первоначального металла демонстрирует медь, концентрация которой одинаково сократилась во всех заготовках на 5-7 %.

Концентрация хрома убывает во всех образцах, однако наиболее интенсивное удаление хрома наблюдается при постоянном токе прямой полярности. Предельное снижение концентрации хрома составляет 20 % от начальной концентрации в электродном металле. Показания концентрации хрома на прямом токе обратной полярности не отличаются от значений на переменном токе. В таблице 7 представлены сводные данные, отражающие изменение концентраций химических элементов при ЭШП всех вариаций в сравнении с электродным металлом.

Таблица 7 – Изменение концентрации химических элементов при ЭШП
относительно электродного металла

№ группы (условное обозначение)	Изменение концентрации химических элементов по элементам относительно электродного металла (↑ – увеличение, ↓ – уменьшение, = – изменений нет)			
	Mn, %	Si, %	Cr, %	S, %
I (ПТ)	↓ 12,1	↓ 14,3	↓ 13,5	↓ 42,86
II (ПТ ВРЭ)	↓ 19,7	↓ 20,0	↓ 13,5	↓ 64,29
III (ПТПП)	↓ 31,8	↓ 25,7	↓ 20,2	↓ 21,43
IV (ПТПП ВРЭ)	↓ 36,4	↓ 25,7	↓ 19,2	↓ 28,57
V (ПТОП)	↓ 24,2	↓ 34,3	↓ 15,4	↓ 57,14
VI (ПТОП ВРЭ)	↓ 28,8	↓ 42,9	↓ 13,5	↓ 64,29

Более точный анализ изменения химической картины ЭШП может быть достигнут при изучении химического состава шлаковых шапок, который приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Химический состав шлаковых шапок

Группа плавок	Массовая доля оксидов, %						
	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	F _{общ}	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
I (ПТ)	5,2	61,9	2,2	1,0	1,5	17,3	0,2
II (ПТ ВРЭ)	4,1	65,6	2,2	1,2	1,5	22,4	0,3
III (ПТПП)	4,3	38,0	2,0	2,6	2,0	41,1	1,7
IV (ПТПП ВРЭ)	4,0	42,8	2,0	1,7	1,2	42,4	0,8
V (ПТОП)	5,0	52,0	2,3	1,2	1,0	33,0	<0,10
VI (ПТОП ВРЭ)	4,7	62,0	2,4	1,5	1,0	20,1	<0,10

Концентрация диоксида кремния соответствует полученным результатам. Учитывая повышенные значения для прямого тока обратной полярности, указанная ранее гипотеза о чрезмерном удалении кремния в этом технологическом режиме ЭШП имеет место.

Концентрация оксида кальция демонстрирует явный эффект сниженной раскисляющей способности ЭШП кальцием при использовании тока обратной полярности. В этом же случае снижению раскисляющей способности шлака кальцием способствует наличие вращения РЭ. Однако, алюминий демонстрирует

обратное поведение. Возможно, что под воздействием обратной полярности и явления ионизации оксиды алюминия более активно распадаются, вследствие чего высвобожденный кислород связывается с кальцием.

Повышенное удаление марганца на прямом токе прямой полярности явно обосновано увеличением концентрации оксидов марганца в шлаке. Следовательно гипотезы об снижении концентрации кремния, марганца и хрома при соответствующем токовом режиме доказываются. В соединениях с металлами (силицидами) кремний имеет отрицательную степень окисления, а повышенное сродство к кислороду стимулирует процесс перехода кремния в соответствующий оксид. Марганец имеет меньшую активность по сравнению с кремнием и чаще имеет положительную степень окисления. В результате чего интенсификации его удаления из металла соответствует именно прямая полярность. Картина удаления хрома аналогична картине удаления марганца.

Был проведен дополнительный анализ концентрации серы, марганца, кремния, хрома по всем слиткам всех групп на предмет выявления более точных средних значений концентраций элементов. Результаты спектрального анализа химического состава слитков показал эффект от влияния изменения рода тока и наличия возмущающего действия в виде вращения тела РЭ при ЭШП. Общее снижение концентрации наблюдается по марганцу, кремнию и хрому. Снижение концентрации серы наблюдается во всех образцах. Удаление фосфора не наблюдается [97-100].

При осуществлении детального сравнительного анализа концентрации отдельных химических элементов по образцам слитков за эталонные значения были взяты значения для ЭШП на переменном токе со стационарным телом расходующего электрода. На рисунках с 19 по 31 существуют следующие обозначения: Э – электродный металл; ПТ – переменный ток; ПТПП – постоянный ток прямой полярности; ПТОП – постоянный ток обратной полярности; ВРЭ – наличие вращения тела расходующего электрода; К – край слитка; Ц – центральная часть слитка.

Наиболее эффективное удаление серы наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением тела расходоуемого электрода и на переменном токе с вращением тела расходоуемого электрода. Сравнительная эффективность составляет 37%. Статистическая диаграмма концентрации серы по всем образцам слитков представлена на рисунке 19.

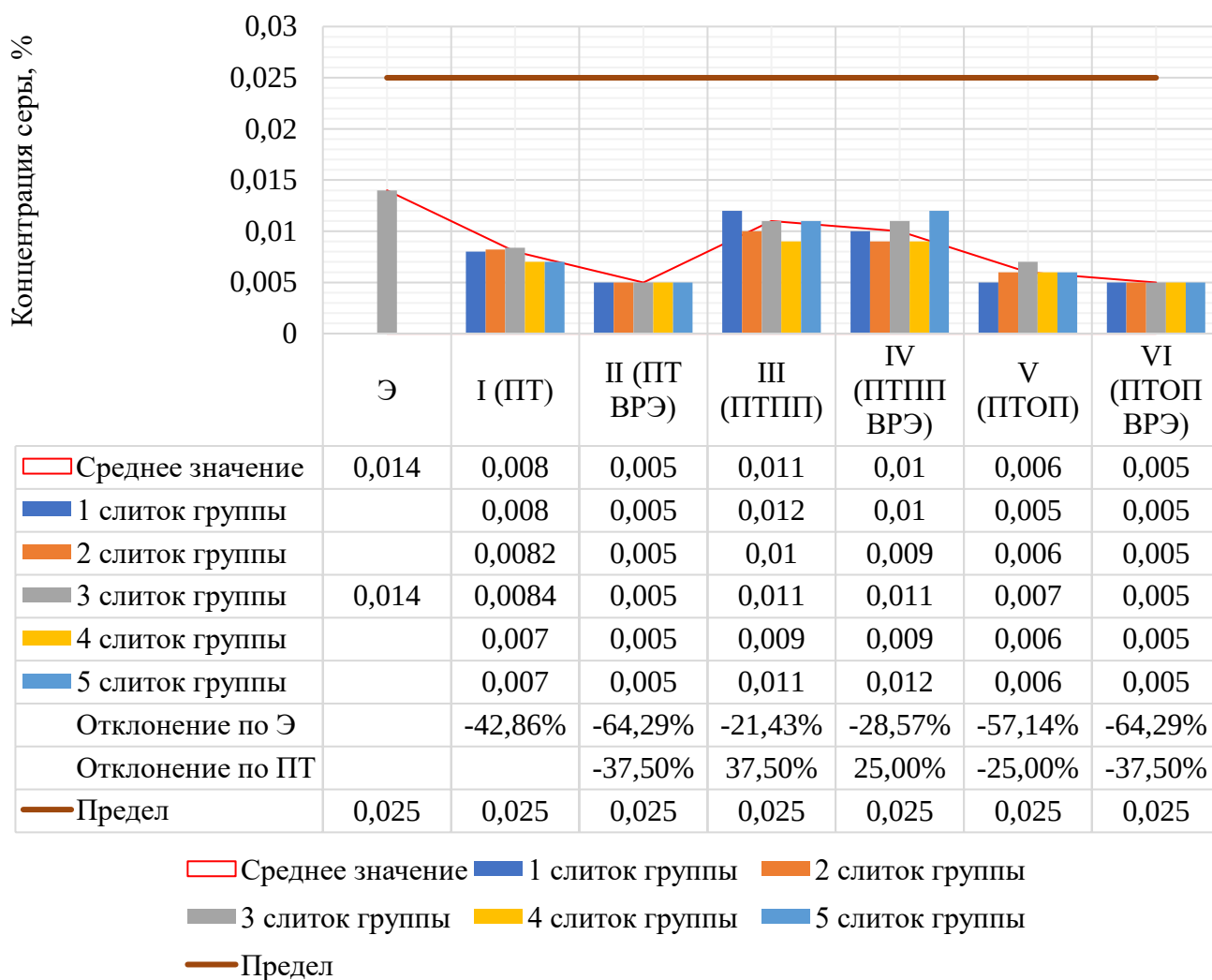


Рисунок 19 – Диаграмма концентрации серы в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

Наибольшее снижение концентрации марганца наблюдается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Сравнительное снижение концентрации составляет 38%. Статистическая диаграмма концентрации марганца по всем образцам слитков представлена на рисунке 20.

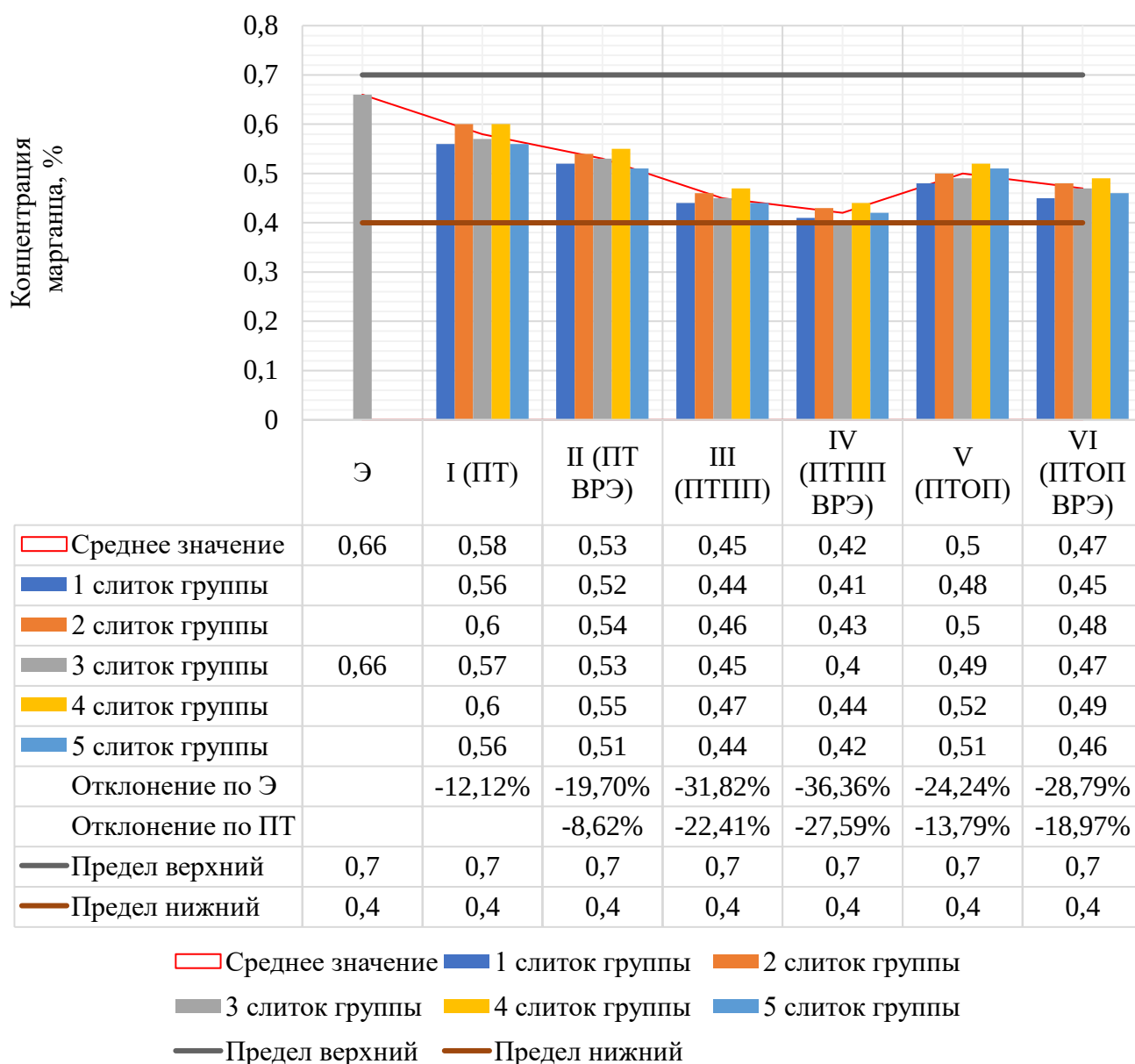


Рисунок 20 – Диаграмма концентрации марганца в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

Наибольшее снижение концентрации кремния наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности. Вращение электрода интенсифицирует удаление кремния в 2 раза по сравнению с неподвижным электродом. Сравнительное снижение концентрации составляет 63%. Статистическая диаграмма концентрации кремния по всем образцам слитков представлена на рисунке 21.

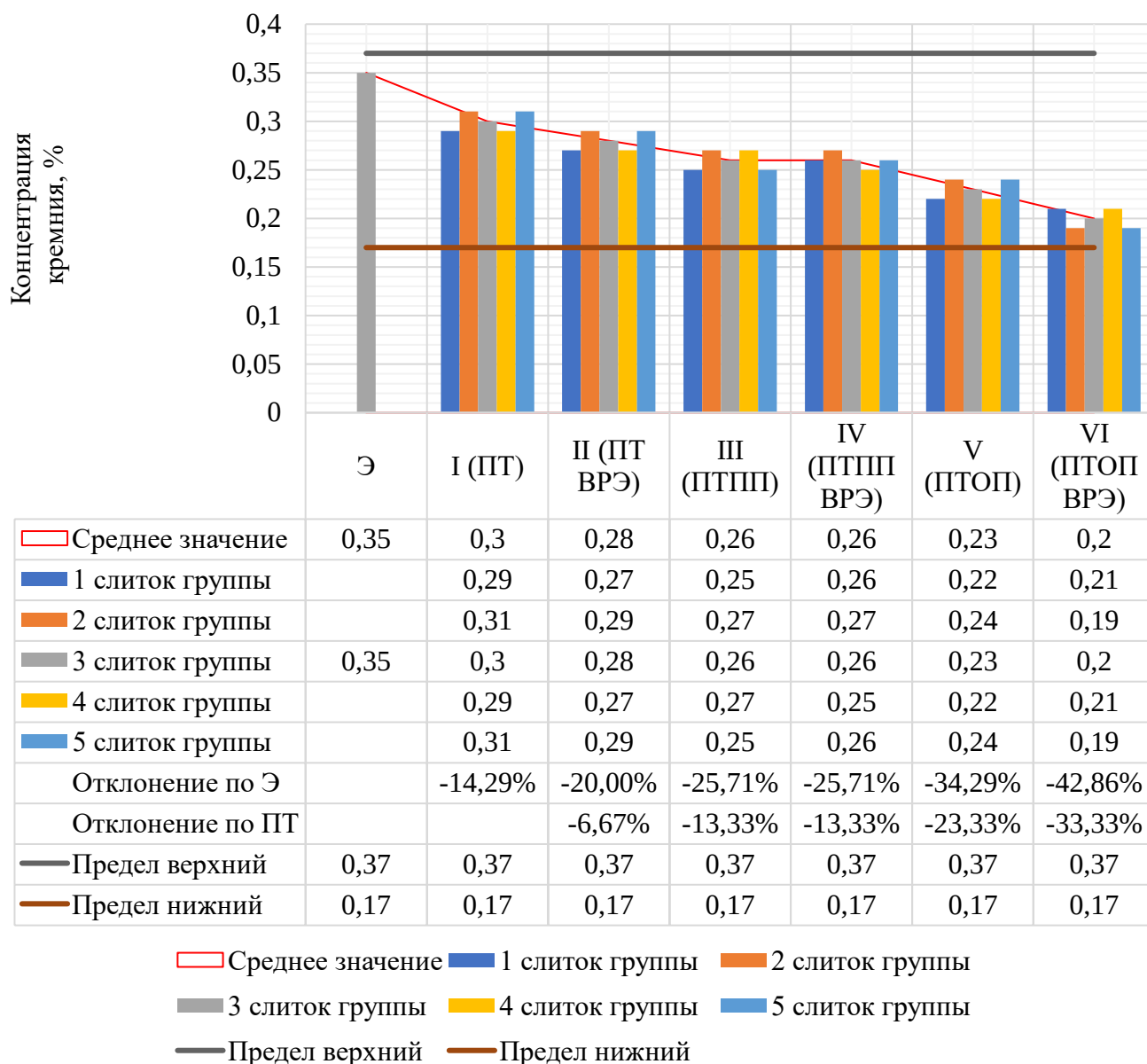


Рисунок 21 – Диаграмма концентрации кремния в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

Наибольшее снижение концентрации хрома наблюдается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Сравнительное снижение концентрации составляет 10 %. Статистическая диаграмма концентрации хрома по всем образцам слитков представлена на рисунке 22.

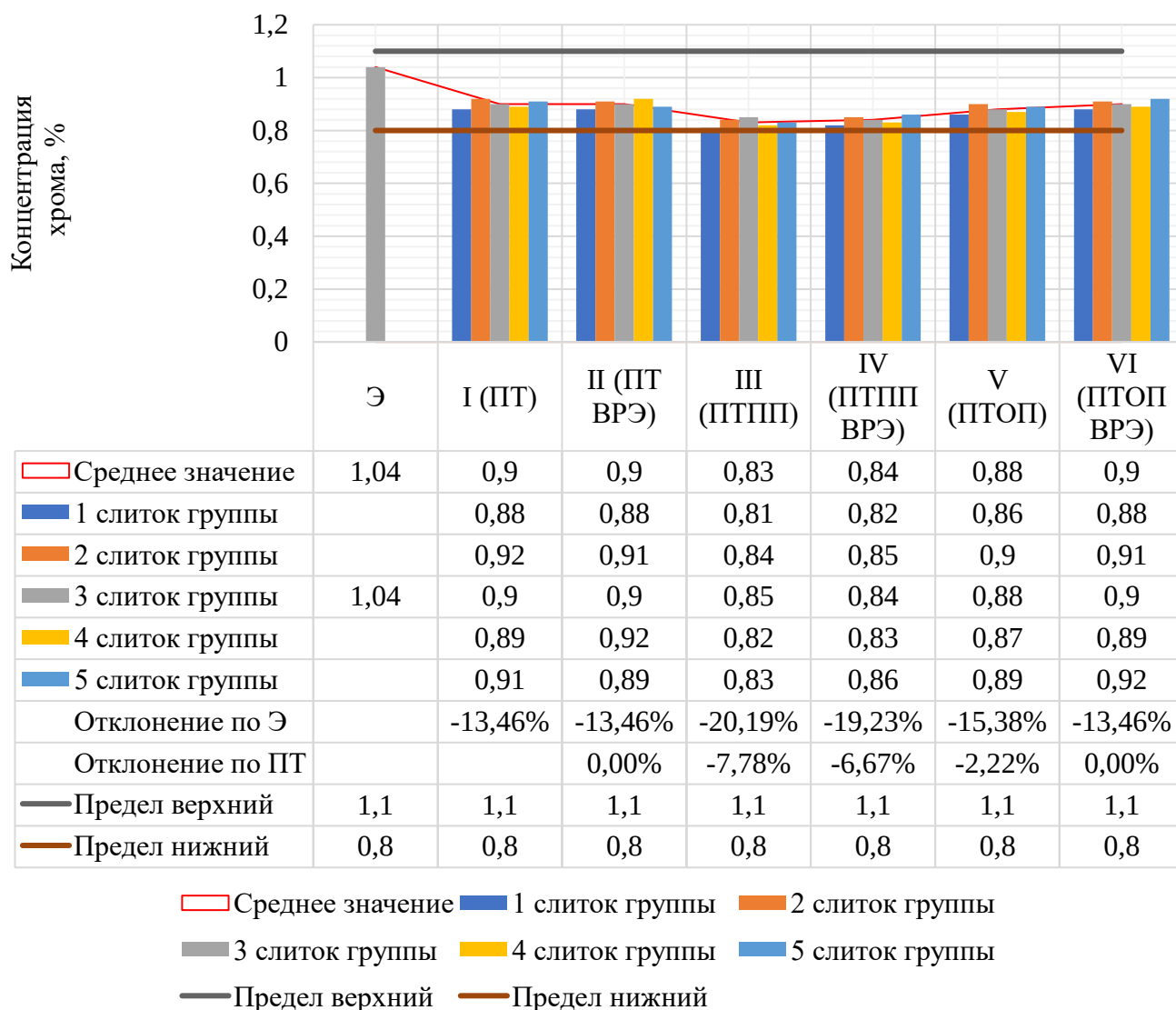


Рисунок 22 – Диаграмма концентрации хрома в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

4.2. Анализ концентрации газов в металле

Контроль изготовления качественных сталей и сплавов следует обеспечивать контролем концентрации газов, растворенных в металле. Далее приведены формулы, описывающие процессы удаления кислорода при ЭШП.



В рамках данного исследования этот шаг необходим для тонкого наблюдения за изменением концентрации газов при использовании постоянного тока взамен переменного, в частности для наблюдения эффекта ионизации [99]. В таблице 9 приведены сведения о концентрации азота, кислорода и водорода в полученных заготовках по группам плавок [100].

Как можно судить по данным таблицы 9, отклонения в концентрации азота выглядят незначительными в относительном сравнении разных технологий ЭШП. В среднем концентрация азота располагается в диапазоне 0,011-0,012 %, однако существует обратный выброс у образца, полученного на постоянном токе обратной полярности, до 0,0093 %. В сравнении со средним значением наблюдается снижение концентрации на 10-15 %.

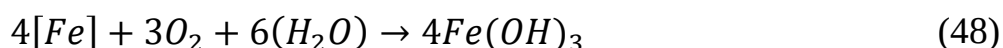
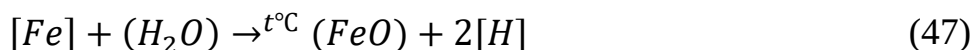
Таблица 9 – Концентрация газов в полученных заготовках

Группа плавок	Концентрация		
	[N]	[O]	[H]
	%	%	%
I (ПТ)	0,012	0,013	0,00017
II (ПТ ВРЭ)	0,011	0,0090	0,00017
III (ПТПП)	0,012	0,011	0,00015
IV (ПТПП ВРЭ)	0,012	0,0054	0,00015
V (ПТОП)	0,0093	0,0058	0,00022
VI (ПТОП ВРЭ)	0,011	0,0037	0,00017

В части удаления кислорода из металла в процессе ЭШП наиболее значительный результат в 0,0037 % наблюдается у ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением РЭ. Несколько худший результат раскисления виден при использовании постоянного тока обратной полярности без вращения РЭ и прямой полярности с вращением РЭ, которым соответствуют концентрации кислорода 0,0058 и 0,0054 % соответственно. Раскисляющая способность ЭШП на переменном токе с вращением РЭ почти вдвое хуже предыдущих результатов и составляет 0,0090 %. Использование тока прямой полярности без вращения РЭ имеет наименьшую раскисляющую способность металла на постоянном токе, о чем говорит значение концентрации кислорода 0,011 %. Таким образом, наиболее эффективное раскисление металла осуществляется при использовании

постоянного тока обратной полярности с вращением РЭ. Кроме того, наличие эффекта вращения РЭ в среднем удваивает раскисляющую способность ЭШП от значений соответствующей полярности постоянного тока, что наглядно видно в таблице 8. Полученные сведения не противоречат предположениям о физической природе отдельных химических компонентов в электромагнитном поле.

Далее представлены формулы процессов удаления водорода при ЭШП.



Формула (31) описывает процесс попадания водорода в чистый металл при, который происходит в подэлектродной зоне печи. Влага, содержащаяся во флюсе, распадается с образованием оксида железа и иона водорода, который неизбежно перейдет в металл. Формула (32) описывает процесс образования связей гидроксидных оснований с железом, которые наблюдаются при взаимодействии с кислородом. Данный процесс также имеет место при ЭШП вследствие разрушения оксидных связей с металлом [101].

При анализе концентрации водорода в закристаллизовавшейся заготовке лучшие показатели его удаления зафиксированы при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Концентрация водорода при данной технологии составляет 0,00015 %, причем наличие вращения тела РЭ никак не влияет на степень его удаления при прямой полярности тока. Вероятно, что при использовании флюса АНФ-6 при плавке в данном токовом режиме существует технологический предел, который может быть смещен далее в направлении более глубокого удаления водорода с помощью вакуумирования атмосферы печи. Гипотеза о наличии технологического ограничения основывается на различии показаний концентрации водорода при использовании постоянного тока обратной полярности с вращением тела РЭ и без него. Видно, что постоянный ток обратной полярности препятствует удалению водорода, концентрация которого равна 0,00022 % и 0,00017 % для стационарного и вращающегося тела РЭ, что подтверждает наличие ионизации при постоянном токе. При сравнении концентрации водорода при использовании

переменного тока с вращением тела РЭ и постоянного тока обратной полярности с вращением тела РЭ наблюдается равенство значений. Можно судить, что факт утончения пленки металла на торце тела РЭ при его вращении способствует усилению рафинирующей способности ЭШП, что также отражается на разнице концентраций при анализе азота и кислорода.

Учитывая тот факт, что водород, как и, например, кремний, могут иметь как положительную, так и отрицательную степень окисления, то стратегия удаления водорода из металлического раствора за счет ионизации является аналогичной при целенаправленном удалении кремния. Поэтому применение прямой полярности имеет наибольший эффект для удаления водорода из соединений типа MeH . Усилить этот эффект можно при сокращении концентрации влаги во флюсе и вакуумировании переплава, что аналогичным образом достигается при ВДП.

Был проведен дополнительный анализ концентрации кислорода, азота и водорода по всем слиткам всех групп на предмет выявления отклонений концентраций газов. В качестве эталонных значений концентраций газов были взяты показания для ЭШП на переменном токе со стационарным телом РЭ [102].

Наиболее активное удаление кислорода наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением тела расходуемого электрода. В сравнении с ЭШП на переменном токе предельное снижение концентрации кислорода составляет 71%. Удаление азота интенсивнее всего осуществляется на ЭШП на постоянном токе обратной полярности. Концентрация азота снижается на 22% в сравнении с ЭШП на переменном токе. Применение вращения тела расходуемого электрода способствует интенсификации раскисления при ЭШП всех типов. Статистические диаграммы концентрации кислорода и азота по всем образцам слитков представлена на рисунках 23 и 24 соответственно.

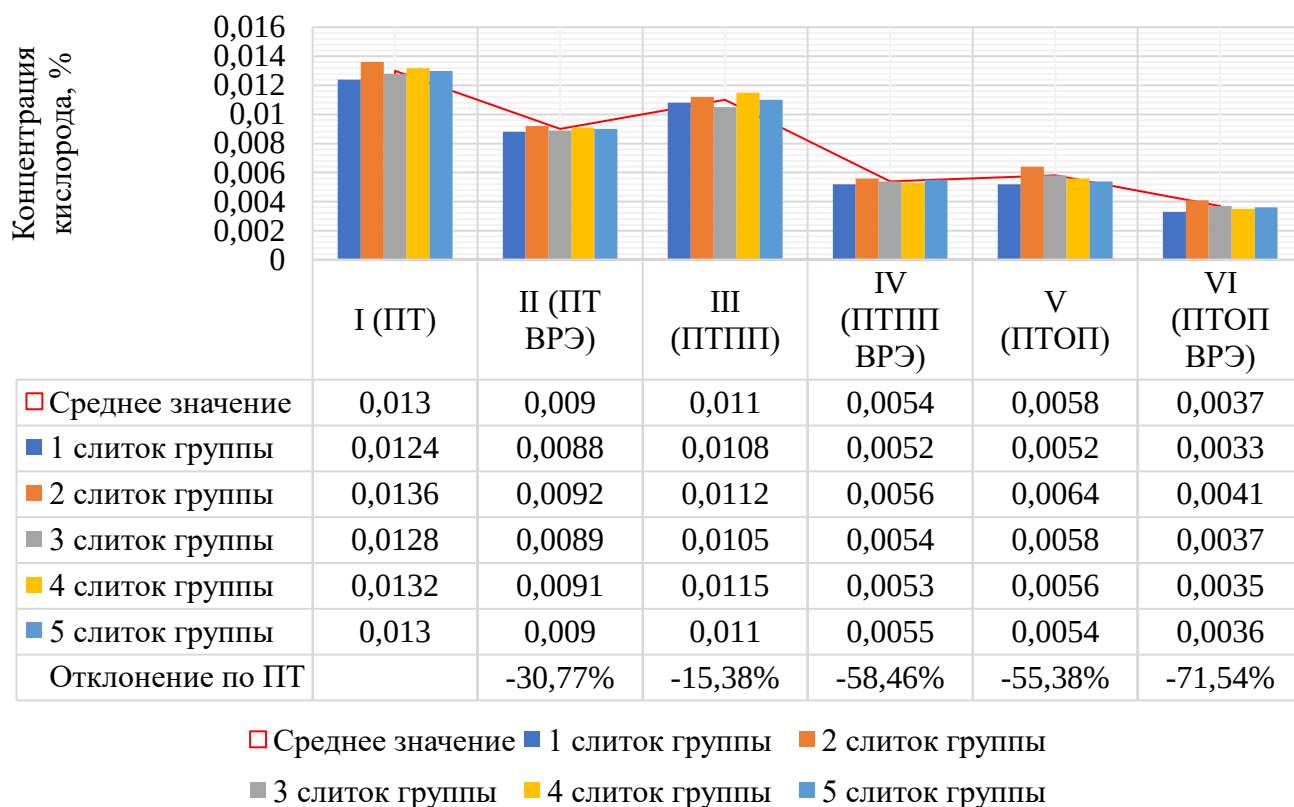


Рисунок 23 – Диаграмма концентрации кислорода в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

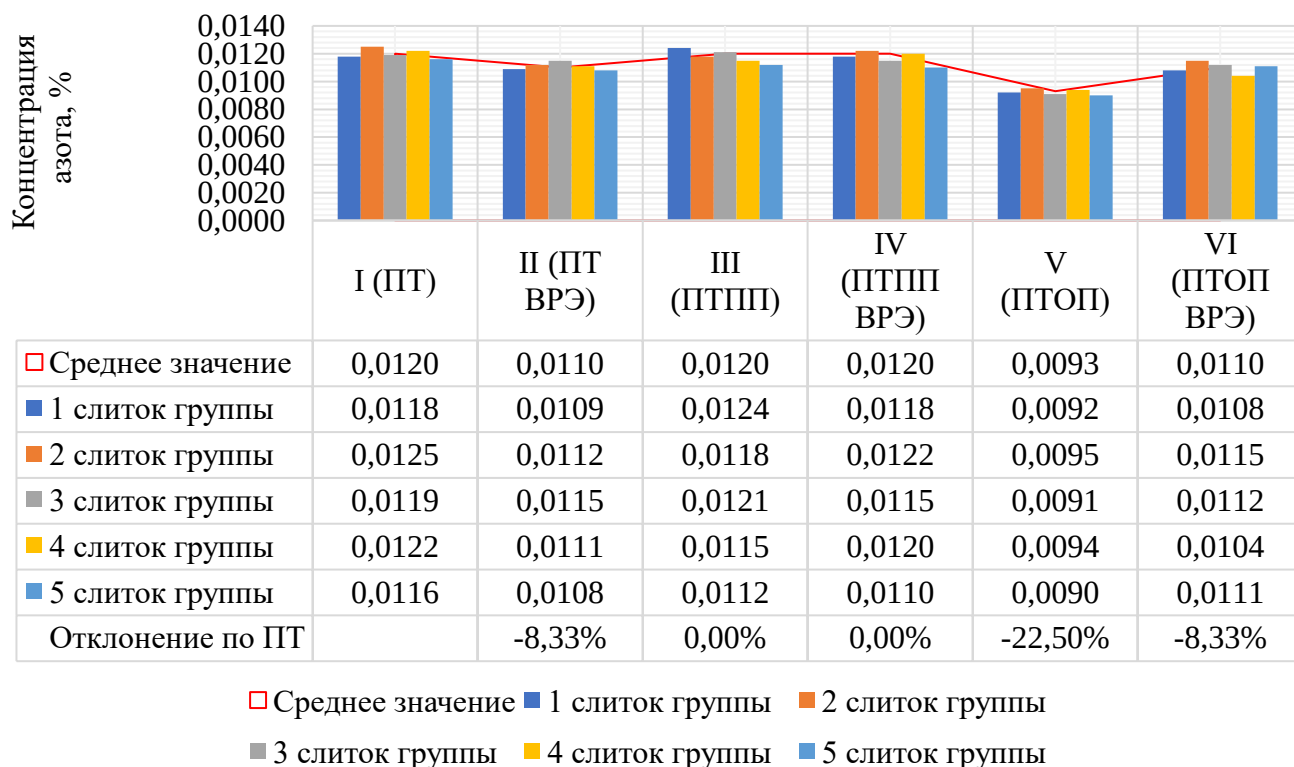


Рисунок 24 – Диаграмма концентрации азота в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

Удаление водорода наблюдается при использовании постоянного тока прямой полярности. Сравнительное снижение концентрации водорода составляет 11 %. Использование постоянного тока обратной полярности способствует насыщению металла ионами водорода из объема шлаковой ванны, что повысило сравнительную концентрацию водорода на 29%. Статистическая диаграмма концентрации водорода по всем образцам слитков представлена на рисунке 25.

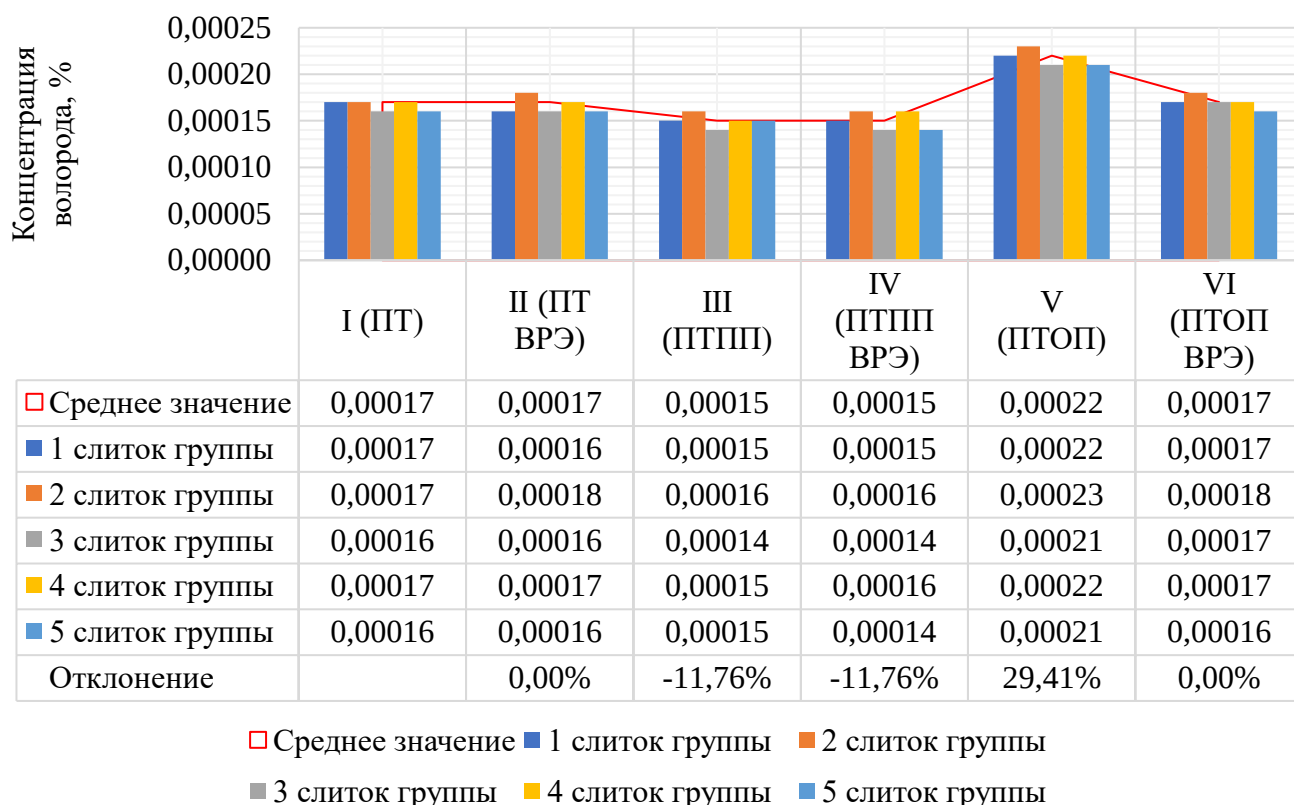


Рисунок 25 – Диаграмма концентрации водорода в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

В таблице 10 представлены сводные данные, отражающие изменения концентраций химических элементов и газов при ЭШП разных вариаций в сравнении с ЭШП на переменном токе.

Таблица 10 – Изменение концентрации химических элементов при ЭШП разных технологических режимов относительно ЭШП на переменном токе

№ группы (условное обозначение)	Изменение концентрации химических элементов по элементам относительно ЭШП на переменном токе (↑ – увеличение, ↓ – уменьшение, = – изменений нет)						
	Mn, %	Si, %	Cr, %	S, %	O ₂ , %	N ₂ %	H ₂ %
II (ПТ ВРЭ)	↓ 8,62	↑ 6,67	= 0	↓ 37,5	↓ 30,8	↓ 8,33	= 0
III (ПТПП)	↓ 22,4	↓ 13,3	↓ 7,78	↑ 37,5	↓ 15,4	= 0	↓ 11,8
IV (ПТПП ВРЭ)	↓ 27,6	↓ 13,3	↓ 6,67	↑ 25,0	↓ 58,5	= 0	↓ 11,8
V (ПТОП)	↓ 13,8	↓ 23,3	↓ 2,22	↓ 25,0	↓ 55,4	↓ 22,5	↑ 29,4
VI (ПТОП ВРЭ)	↓ 19,0	↓ 33,3	= 0	↓ 37,5	↓ 71,5	↓ 8,33	= 0

4.3. Оптический анализ микроструктуры металла на предмет наличия неметаллических включений в полученных слитках

Определение рафинирующей способности ЭШП на постоянном токе осуществлялось при проведении серии натурных экспериментов на полупромышленной печи ЭШП А-550. В качестве исходного металла использовалась сталь марки 30ХМА. Все множество слитков было сгруппировано по используемому технологическому режиму ЭШП. Из каждой группы полученных слитков, после их механической обработки резанием, были отобраны единичные экземпляры с целью подготовки образцов микрошлифов.

Металлографический анализ проводился с целью исследования загрязненности полученных слитков неметаллическими включениями сульфидов, нитридов и оксидов при разных используемых токовых режимах ЭШП. Взятие образцов осуществлялось в центральной и периферийной частях поперечного среза слитков. Поперечный срез осуществлялся посередине продольной оси слитков. Расстояние до периферийного места взятия образца определялось как 2/3 радиуса слитка. В дальнейшем все образцы из центральной части слитков маркируются буквой «Ц», из периферийной – буквой «К». Непосредственный анализ микрошлифов осуществлялся с помощью металлографического микроскопа Carl Zeiss Observer D1.m, оснащенного программным комплексом Thixomet PRO. Наблюдение поверхностей микрошлифов осуществлялось при использовании

увеличения $\times 500$ крат с полем зрения 250×150 микрон. В процессе наблюдения поверхностей микрошлифов осуществлялась фотофиксация полей зрения в количестве 50 штук на каждый образец. Всего было исследовано 14 образцов с суммарным количеством полей зрения, равным 700 штук [103, 104]. В качестве эталона были взяты образцы слитка ЭШП на переменном токе без вращения тела расходуемого электрода. Также для сравнения были добавлены образцы исходного металла из тела расходуемого электрода. Далее по тексту для отличия результатов исследуемых образцов были применены следующие условные обозначения: Э – исходный металл расходуемого электрода; I (ПТ) – ЭШП на переменном токе; II (ПТ ВРЭ) – ЭШП на переменном токе с вращением расходуемого электрода; III (ПТПП) – ЭШП на постоянном токе прямой полярности; IV (ПТПП ВРЭ) – ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением расходуемого электрода; V (ПТОП) – ЭШП на постоянном токе обратной полярности; VI (ПТОП ВРЭ) – ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением расходуемого электрода.

Фотоснимки поверхности микрошлифов приведены на рисунках 26 и 27.

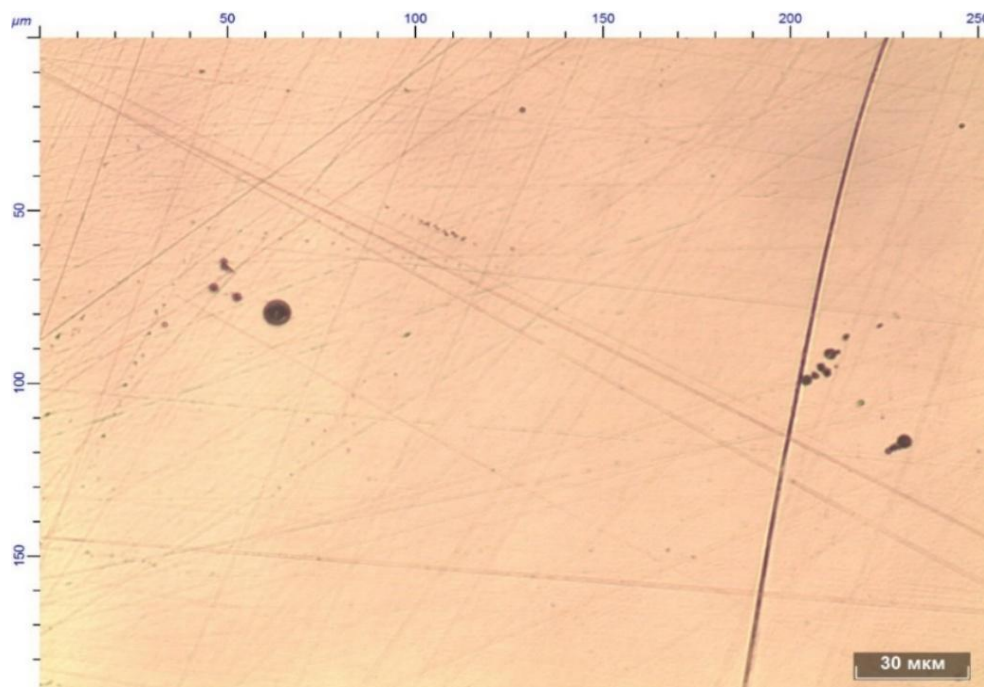


Рисунок 26 – Снимок поверхности микрошлифа образца ЭШП на постоянном токе без маркировки НВ

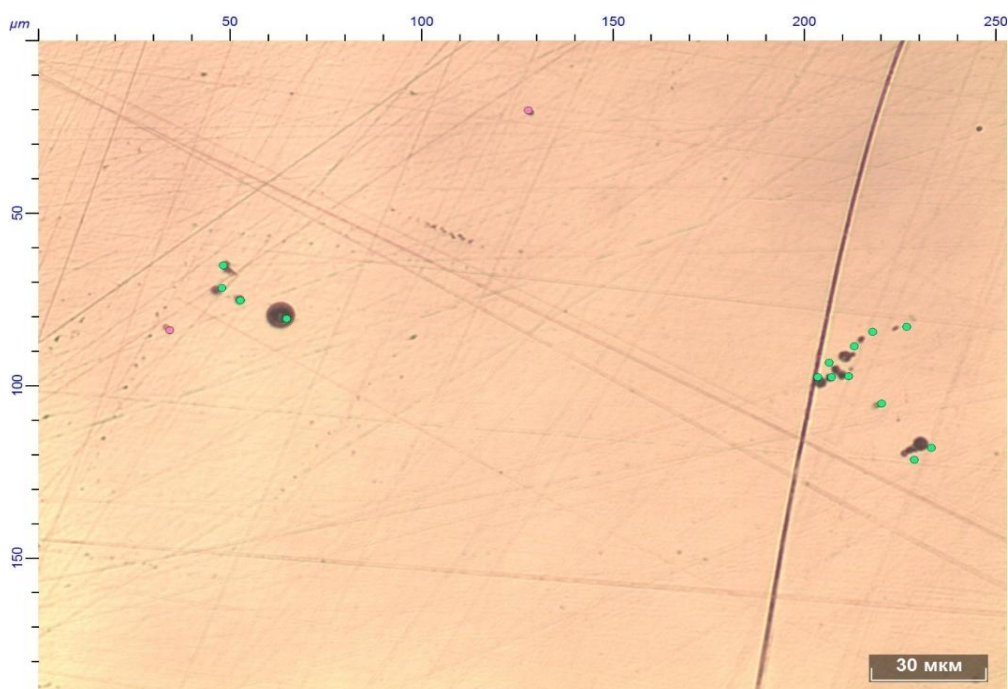


Рисунок 27 – Снимок поверхности микрошлифа образца ЭШП на постоянном токе с цветовой маркировкой НВ (зеленый – сульфиды, розовый – оксиды, синий – нитриды)

В результате исследования образцов микрошлифов на наличие и концентрацию неметаллических включений получены сведения, которые были сведены в таблицы с отображением их значений в сопряженных диаграммах. Кроме абсолютных значений приводится и относительное значение в процентах для края или центра соответствующего образца. Все образцы слитков сравниваются с электродным металлом «Э». Кроме того, образцы слитков, полученных по технологиям ЭШП, отличным от ЭШП на переменном токе, сравниваются со слитками, полученными по этой технологии (I (ПТ)). Общие количественные значения концентрации неметаллических включений по группам слитков ЭШП изображен на рисунке 28. Далее более детально отображены изменения концентрации НВ по каждому виду с учетом мест взятия микрошлифов.

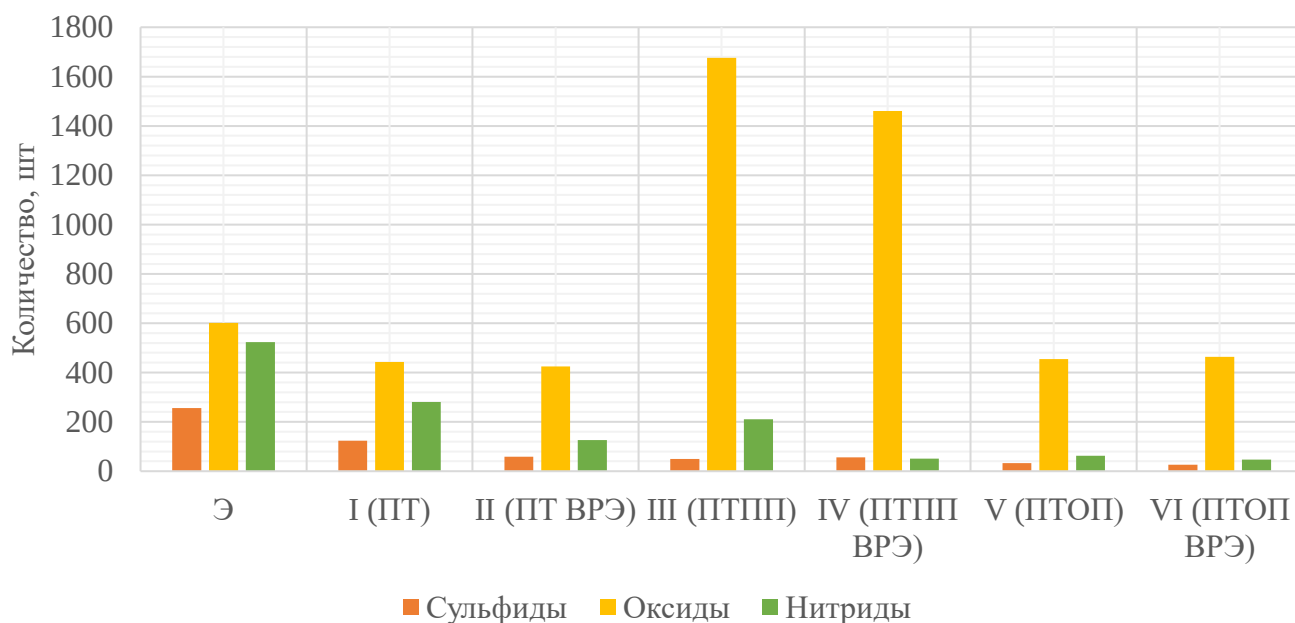


Рисунок 28 – Количество НВ по их видам по всем группам слитков

На рисунке 29 продемонстрированы результаты анализа образцов на наличие (количество) и плотность сульфидов. По данным рисунка 29 видно, что количество сульфидов уменьшается при ЭШП всех технологических режимов в сравнении с электродным металлом. Наибольшее снижение количества сульфидов достигается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением электрода на 85 % и 92 % на периферии и центре соответственно относительно электродного металла. В сравнении ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением расходуемого электрода с технологией ЭШП на переменном токе разница составляет 61 % и 91 % для периферии и центра соответственно. Наименьшее снижение количества сульфидов достигается при ЭШП на переменном токе на 52 % и 51 % для периферии и центра соответственно относительно электродного металла. Однако, в сравнении с ЭШП на переменном токе наименьшее снижение количества сульфидов достигается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности на 78 % и 48 % для периферии и центра соответственно.

На рисунке 30 продемонстрированы результаты анализа образцов на наличие (количество) и плотность нитридов. По данным рисунка 30 видно, что количество нитридов уменьшается при ЭШП всех технологических режимов в сравнении с

электродным металлом. Наибольшее снижение количества нитридов достигается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением электрода на 83 % и 96 % на периферии и центре соответственно относительно электродного металла. В сравнении ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением расходуемого электрода с технологией ЭШП на переменном токе разница составляет 76 % и 90 % для периферии и центра соответственно. Наименьшее снижение количества нитридов достигается при ЭШП на переменном токе на 28 % и 56 % для периферии и центра соответственно относительно электродного металла. Однако, в сравнении с ЭШП на переменном токе наименьшее снижение количества сульфидов достигается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности, где в центре наблюдается снижение на 48 %, а на периферии наблюдается увеличение количества нитридов на 1,5 %.

На рисунке 31 продемонстрированы результаты анализа образцов на наличие (количество) и плотность оксидов. На диаграмме наблюдается значительный выброс по количеству и плотности оксидов при ЭШП на постоянном токе прямой полярности без вращения и с вращением тела расходуемого электрода. Наибольшее превышение количества оксидов в сравнении с электродным металлом составляет 151 % и 222 % для периферии и центра соответственно, что эквивалентно превышению в 2,5 и 3,2 раза соответственно. При использовании иных технологий ЭШП Концентрация оксидов уменьшается при ЭШП всех технологических режимов в сравнении с электродным металлом. Наибольшее снижение количества оксидов достигается при ЭШП на переменном токе с вращением электрода на 33 % и 23 % на периферии и центре соответственно относительно электродного металла. Наименьшее снижение количества оксидов достигается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности на 21 % и 29 % для периферии и центра соответственно относительно электродного металла. В сравнении с технологией ЭШП на переменном токе использование иных технологии ЭШП не оказывает значительного влияния на удаление оксидов.

Фотоснимки микрошлифов всех режимов ЭШП приведены в приложении А.

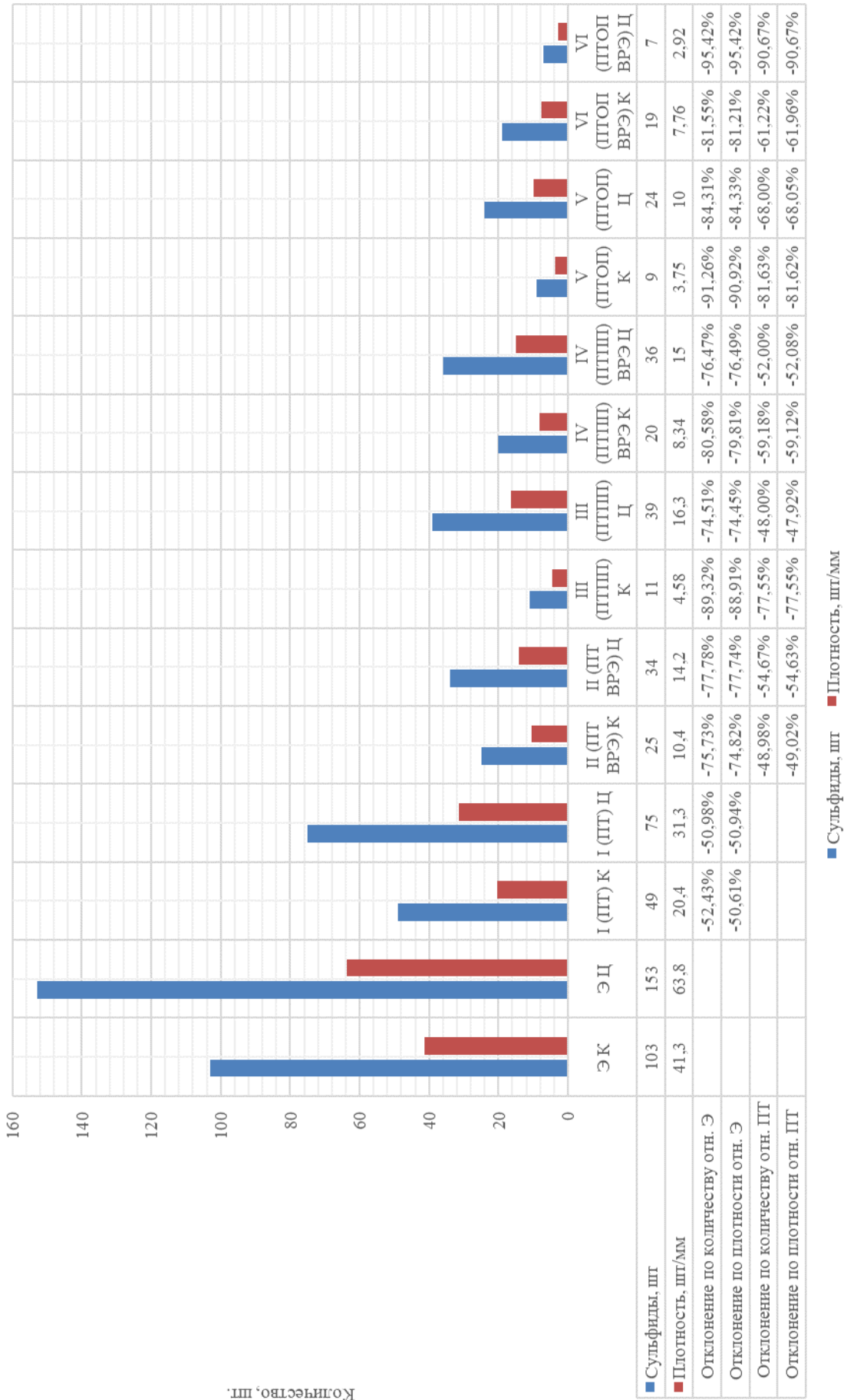


Рисунок 29 – Диаграмма количества и плотности расположения сульфидов с учетом места локализации полей зрения в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами



Рисунок 30 – Диаграмма количества и плотности расположения нитридов с учетом места локализации полей зрения в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами



Рисунок 31 – Диаграмма количества и плотности расположения оксидов с учетом места локализации полей зрения в полученных слитках после ЭШП с разными технологическими режимами

Проанализировав результаты исследования, можно сделать несколько выводов. Во-первых, ЭШП на постоянном токе оказывает влияние на рафинирующую способность данной технологии. В зависимости от используемой полярности наблюдается соответствующий эффект в виде более интенсивного удаления неметаллических включений из металла получаемых слитков.

Во-вторых, использование вращения тела расходуемого электрода интенсифицирует процесс удаления неметаллических включений, что наглядно изображено на рисунках 1-3. Кроме того, применение вращения расходуемого электрода влияет на перераспределение неметаллических включений, смещая их повышенную концентрацию из центральной части слитка на периферийную в поперечном сечении.

В-третьих, наиболее благоприятно применение постоянного тока влияет на удаление сульфидов и нитридов. Вместе с уменьшением их количества снижается и их плотность. Самих неметаллических включений этих типов становится не только меньше по количеству, но и расстояние между ними становится значительно больше. Отдельного внимания требует картина изменения оксидов. Наблюдаемый статистический выброс по количеству демонстрирует ухудшение общей картины по оксидам при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Однако, учитывая параметр плотности, значения которого изменяются пропорционально количеству самих оксидов позволяет судить об изменении размера самих частиц. Несмотря на то, что количество частиц увеличилось, их плотность также выросла, что говорит об измельчении оксидов и переходе их к виду строчных эндогенных скоплений в теле закристаллизовавшегося металла. Данную ситуацию можно охарактеризовать как наличие неблагоприятных условий для перехода кислорода в шлак из-за более активного окисления кремния, оксиды которого и составляют основную долю всего числа оксидов. Данное суждение также подтверждается менее выраженным удалением кремния из металла при ЭШП на постоянном токе прямой полярности в сравнении с обратной полярностью.

4.4. Валидация результатов численной модели

Совмещение результатов натурного эксперимента с предварительным математическим моделированием является необходимым этапом валидации спрогнозированных результатов, особенно при использовании математического аппарата в аналогичных исследованиях или практическом использовании без обязательной проверки каждого опытного результата.

Для данного исследования наиболее точным и доступным способом валидации разработанной численной модели является сравнение форм фронта кристаллизации. На рисунке 32 продемонстрирована операция наложения числового поля температуры, описывающего форму фронта кристаллизации, на снимок соответствующего темплета. Макротемплеты подвергались предварительной механической обработке и полировались до получения зеркальной поверхности, т.е. до шероховатости не менее $Ra\ 0,4$. Отполированная поверхность подвергалась травлению 5% раствором азотной (пикриновой) кислоты для последующей фиксации фронта кристаллизации при визуальном осмотре.

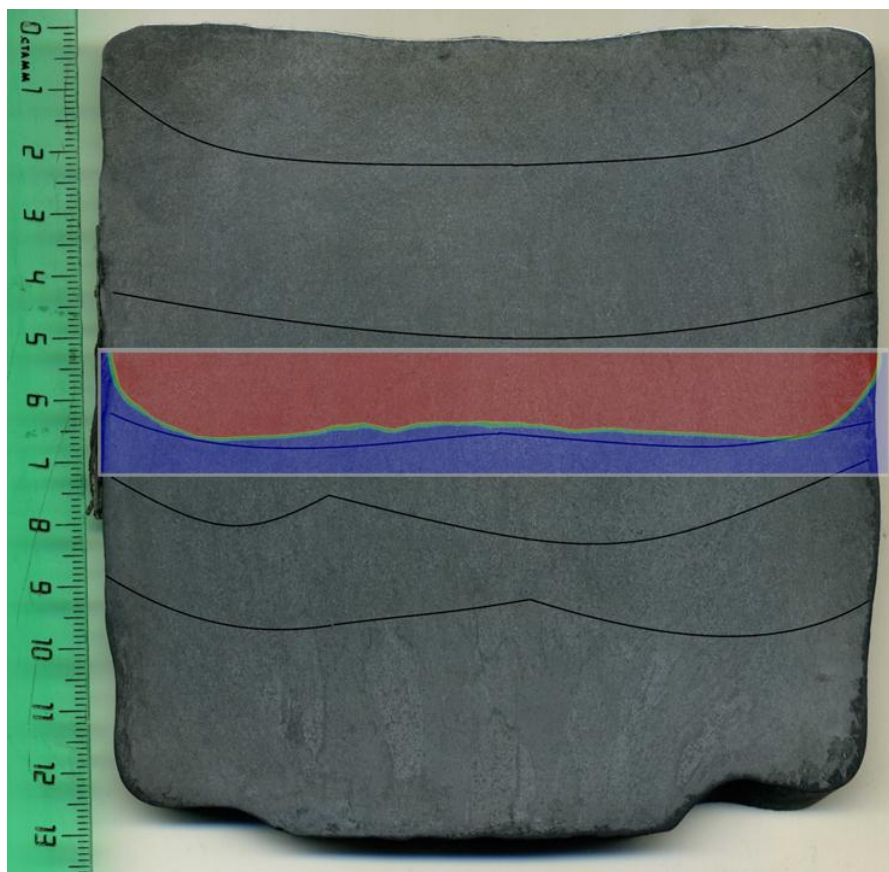


Рисунок 32 – Валидация результатов моделирования

Здесь в качестве фона взят снимок темплета от заготовки ЭШП на постоянном токе с вращением РЭ. Заранее на нем было обозначено черными линиями множество протравленных позиций фронта кристаллизации. Поверх него наложен полупрозрачный рисунок 11а). Наложение осуществляется именно на это место в отдалении на 60 мм от дна слитка, так как чуть раньше было запущено вращение РЭ. Нижние линии фронта кристаллизации наглядно демонстрируют дефект послойной кристаллизации с искаженной формой фронта кристаллизации, который постепенно приходит в стабильную форму. Для сравнения на рисунке 33 приведен аналогичный снимок с обозначенными фронтами кристаллизации для технологии ЭШП на постоянном токе без вращения тела РЭ.

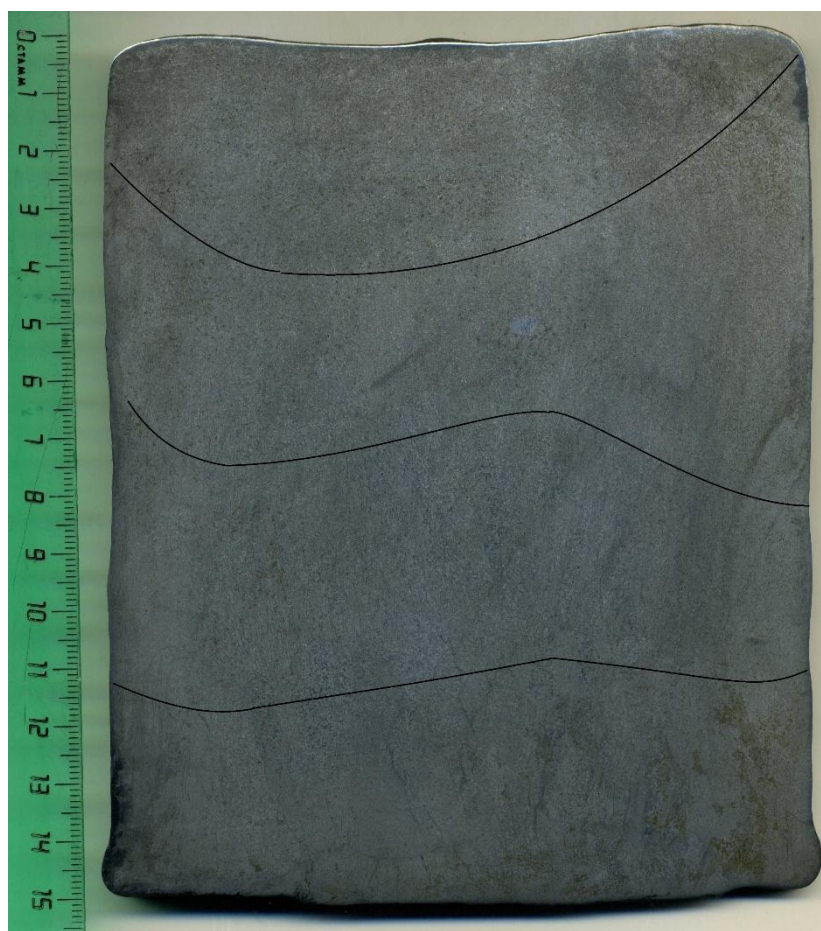
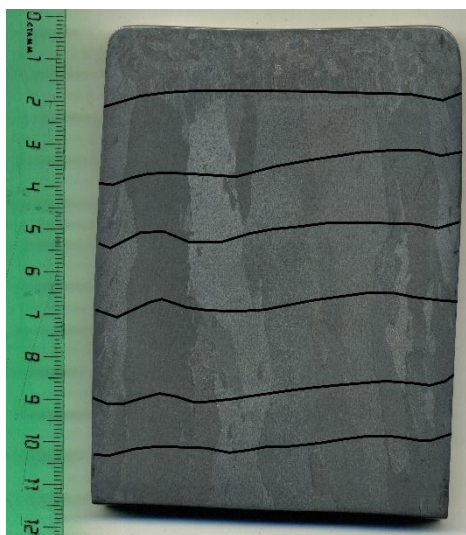


Рисунок 33 – Фронты кристаллизации при ЭШП на постоянном токе без вращения РЭ

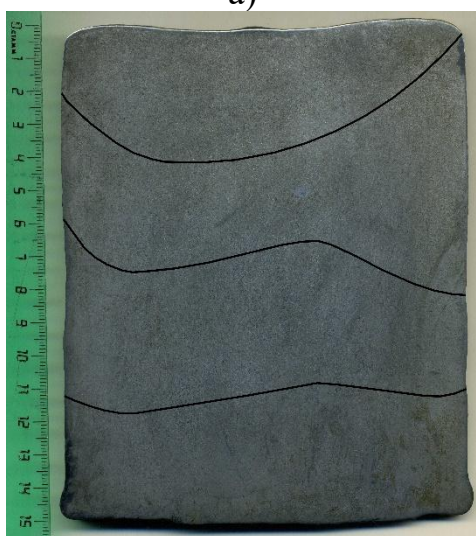
На рисунке 34 приведены фронты кристаллизаций на всех снятых темплетах при разных режимах ЭШП.



а)



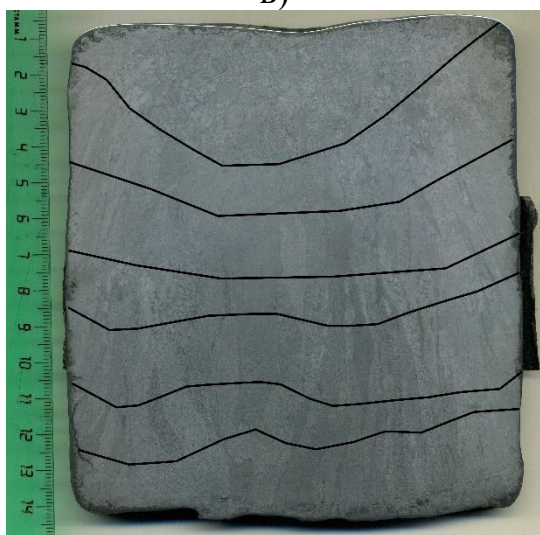
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 34 – Фронты кристаллизации при разных режимах ЭСП: а) – ПТ; б) – ПТ ВРЭ; в) – ПТПП; г) – ПТПП ВРЭ; д) – ПТОП; е) – ПТОП ВРЭ

Из рисунка 32 видно, что форма фронта кристаллизации численной модели похожа на свой натурный аналог на удовлетворительном уровне. Видно, что и в модели, и на темплете наблюдаются периферийные незначительные мениски, а сама форма фронта кристаллизации очень близка к плоской. Также видно, что на темплете у стенок ВК фронт является более пологим в отличие от числового поля, что может являться следствием неточности коэффициента теплопроводности граничного условия. Общая коррекция модели возможна в части более тонкой настройки граничных условий.

В верхней части темплета наблюдается дальнейшее преобразование формы фронта кристаллизации, где он приобретает более выгнутую форму, что является следствием снижения токовой мощности и завершения плавки с операцией выведения усадочной раковины.

При рассмотрении общей картины изменения формы фронта кристаллизации на рисунке 34 можно заметить влияние вращения тела РЭ на формирования слитка. В проведенных экспериментах подобранный режим вращения успешно компенсировал эффект магнитного дутья, однако для ЭШП на переменном токе и постоянном токе обратной полярности скорость вращения оказалась избыточной, что повлекло возникновение периферийного тороидного мениска металлической ванны. Полученные результаты подтверждают гипотезу о возможности управления локализацией тепловых центров и рассмотрение капли как основного источника теплоты, вносимого в металлическую ванну. Использование постоянного тока обратной полярности локализует тепловой центр на поверхности торца РЭ, что при небольших значениях тока позволяет формировать пологую ванну с блуждающими менисками под воздействием магнитного дутья.

Фотоснимки макроструктуры без обработки располагаются в приложении Б.

Выводы по главе 4

Спектральный анализ химического состава заготовок показал эффект от влияния вариаций технологий ЭШП, используемых в данной работе. Общий угар

наблюдается по марганцу, кремнию и хрому. Результат десульфурации разной степени эффективности наблюдается во всех образцах.

Наиболее эффективная десульфурация наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности. Вращение электрода не приносит значительного эффекта.

Наибольший угар марганца наблюдается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Вращение электрода не приносит значительного эффекта.

Наибольший угар кремния наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности. Вращения электрода интенсифицирует угар в 1,5-2 раза сильнее по сравнению с неподвижным электродом

Наибольший угар хрома наблюдается при ЭШП на постоянном токе прямой полярности. Вращение электрода интенсифицирует угар в среднем на 5-10 % по сравнению с неподвижным электродом.

Наиболее активное раскисление наблюдается при ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением РЭ. Применение вращения РЭ в среднем вдвое увеличивает раскисляющую способность ЭШП всех типов на постоянном токе.

Удаление водорода в наибольшей степени достигается при использовании постоянного тока прямой полярности.

Валидность модели подтверждена наложением изображения числового поля фронта кристаллизации на изображение соответствующего темплета. Уровень валидности оценен как удовлетворительный и может быть улучшен точной настройкой граничных условий модели. Модель может успешно применяться для дальнейших исследований ЭШП.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

5.1. Определение показателей удельной производительности и энергоемкости ЭШП

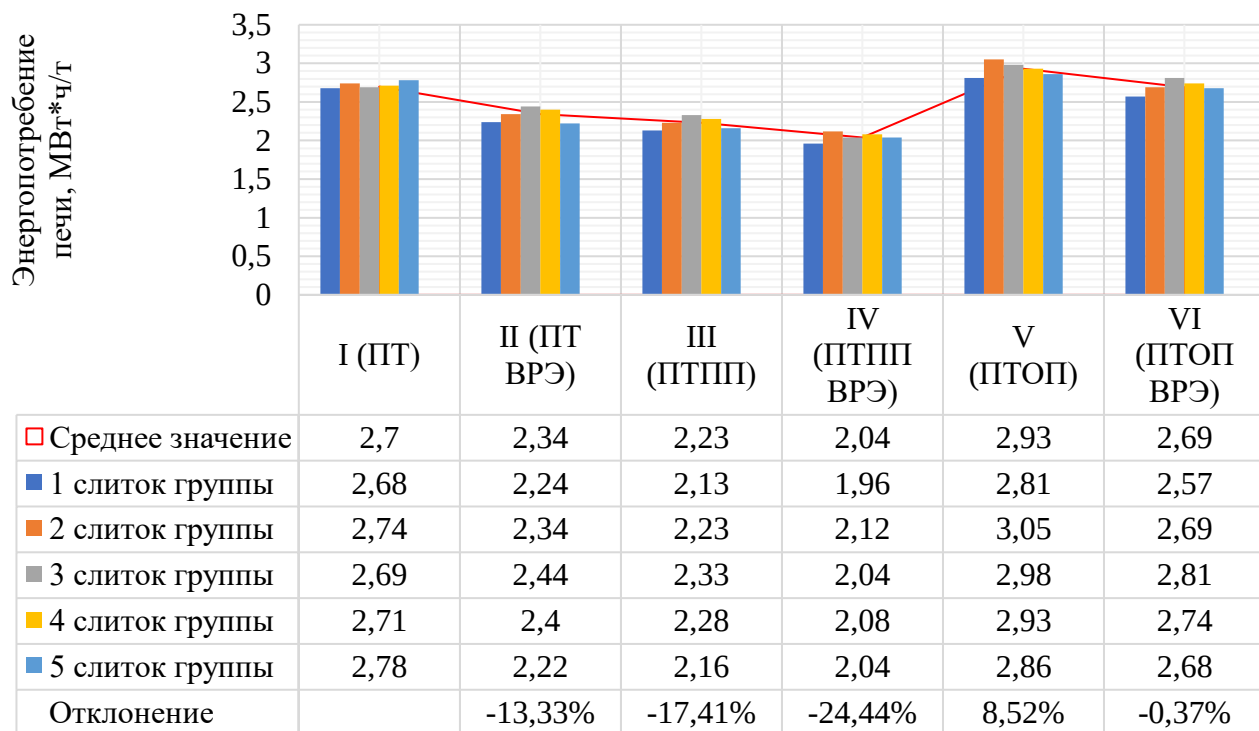
Использование постоянного тока взамен переменного при ЭШП вносит значительные изменения в экономические показатели производства. Для оценки энергоэффективности каждой из рассматриваемых в рамках данной работы вариации технологии ЭШП были сняты показания общего потребления тока с каждой опытной плавки. Собранные сведения использовались для расчета средней линейной скорости переплава для каждой вариации технологии ЭШП. Все 30 заготовок переплавлялись при одинаковом токовом режиме согласно показаниям измерительных приборов печи, т.е. 1500 А и 46 В для силы тока и напряжения соответственно. Ранее упоминаемые группы плавок, соответствующие технологическим режимам ЭШП, представлены в виде отдельных позиций. Время, отведенное на каждую плавку, жестко фиксировалось для всей группы исходя из показаний каждой первой плавки из 6 групп. Для лучшей наглядности полученных результатов производительности и энергоемкости экспериментальных плавок сформированы две сравнительные диаграммы, отражающие удельное энергопотребление тока и линейную скорость переплава, которые отражены на рисунках 35 и 36 соответственно.

Показатели энергоемкости и производительности вариаций технологий ЭШП имеют видимые отличия. Для используемых диаметральных размеров тела расходного электрода и водоохлаждаемого кристаллизатора 60 мм и 120 мм соответственно наиболее энергоэффективной и производительной является технология ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением тела расходного электрода (группа IV). В сравнении с ЭШП прирост скорости переплава составляет 34 %, снижение энергопотребления составляет 24 %.

ЭШП на постоянном токе обратной полярности демонстрирует ухудшение показателей энергоэффективности и производительности: потребление тока увеличивается на 9 %, скорость переплава уменьшается на 21 %. Применение

вращения тела расходуемого электрода приближает эти показатели к эталону, но не приводит к равным значениям. Очевидно, что это является следствием ухудшения равномерности прогрева шлаковой ванны, что частично нивелируется использованием вращения тела расходуемого электрода.

В исполнениях печи ЭШП всех родов тока наблюдается улучшение показателей энергоэффективности и скорости переплава при вращении тела РЭ.



Режим ЭШП и энергоэффективность относительно переменного тока со статическим РЭ в %

□ Среднее значение ■ 1 слиток группы ■ 2 слиток группы
■ 3 слиток группы ■ 4 слиток группы ■ 5 слиток группы

Рисунок 35 – Диаграмма энергопотребления печи ЭШП А-550 с использованием различных токовых режимов и наличием или отсутствием вращения тела расходуемого электрода

Учитывая малую удельную переплавляемую массу, результаты эксперимента в части удельного энергопотребления можно считать завышенными в 1,5-2 раза относительно предполагаемых показателей при промышленной выплавке слитков массой порядка 1-5 т [105].

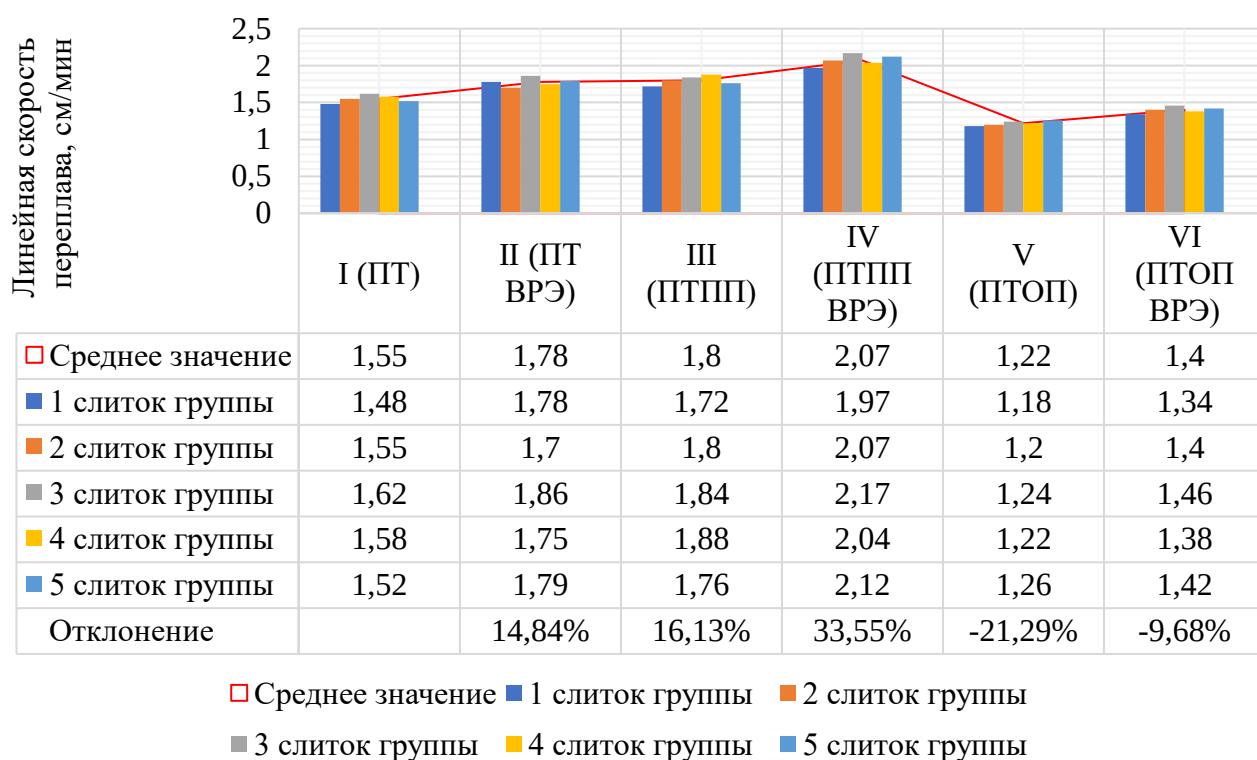


Рисунок 36 – Диаграмма линейной скорости переплава печи ЭШП А-550 с использованием различных токовых режимов и наличием или отсутствием вращения тела расходоуемого электрода

Выводы по главе 5

Показатели энергоемкости и производительности вариаций технологий ЭШП имеют видимые отличия. Наиболее энергоэффективной и производительной является технология ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением тела расходоуемого электрода. В сравнении с технологией ЭШП на переменном токе прирост скорости переплава составляет 34 %, падение энергопотребления составляет 24 %. Наименее энергоэффективной технологией ЭШП является ЭШП на постоянном токе обратной полярности. В сравнении с ЭШП на переменном токе скорость переплава увеличена на 21 %, энергоэффективность снижена на 9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогу проведенного исследования было сформировано несколько ключевых положений, отражающих полноту выполнения поставленных задач и достижения поставленной цели. Технология ЭШП является основой для глубокой модернизации технологических особенностей при совмещении существующего множества токовых режимов и механического воздействия, что делает ее наиболее универсальным агрегатом для выплавки высококачественных сталей и сплавов. Суммарно можно предложить минимум 2 самостоятельные вариации использования ЭШП для достижения наилучшего эффекта в части повышения качества получаемых заготовок: технология ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением РЭ; технология ЭШП на постоянном токе обратной полярности с вращением РЭ.

ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением тела РЭ имеет наилучшие показатели интенсификации переплава с минимизацией энергозатрат. Вращение тела РЭ электрода устраняет дефект послойной кристаллизации металла в слитках, что позволяет осуществлять ЭШП с высокой изотропностью свойств и гомогенностью химического состава по всему объему металла. Применение постоянного тока прямой полярности при ЭШП обеспечивает принципиальную возможность глубокого удаления водорода из металла. Данный эффект будет усилен при применении вакуумирования атмосферы печи.

Строительство печей ЭШП на постоянном токе вновь может иметь экономические препятствия, однако их можно возводить при модернизации печей ВДП механизмом вращения РЭ. Более сложная конструкция печей ВДП, оснащенных точно настраиваемым электрододержателем является благоприятным условием для модернизации в части минимизации расходов на дооснащение материальной базы.

Использование цифровых двойников оказывает значительную и незаменимую помощь при исследовании скрытых физико-химических процессов в рабочей зоне печи. Благодаря созданному цифровому двойнику были получены

сведения о температурных полях внутри ШВ и МВ и распределении тока при отсутствии симметричности токоподвода, что позволило осуществить прогнозирование распределения капель металла при использовании вращения РЭ и изменение формы фронта кристаллизации МВ. Полученные сведения позволили разработать эмпирическую формулу для расчета оптимальной скорости вращения тела РЭ и диаметр ожидаемой траектории падения капель. Валидность численной модели подтверждена результатами натурного эксперимента путем сравнения полученных форм фронта кристаллизации. Существенным недостатком цифрового двойника, разработанного в данной работе, является принципиальная особенность итерационного решения уравнений математической физики, описывающих ньютоновскую механику сплошных сред. Общая продолжительность всего итерационного процесса для всех исполнений численной модели составляет около 300 часов, что значительно растягивается во времени на период порядка 6-12 месяцев при наложении организационных особенностей осуществления работы.

Перспективой для дальнейшего усовершенствования детального моделирования скрытых физико-химических процессов в электросталеплавильных печах и агрегатах является переход к моделям сплошных сред, описываемых в рамках лагранжевой механики. При использовании вспомогательных аппаратных математических и/или графических ускорителей период вычислений сокращается значительно, что демонстрируется при использовании гидродинамики сглаженных частиц (или т.н. SPH-моделей) [106]. Параллельная ветвь развития SPH-моделей лежит в поле использования глубокого обучения при использовании искусственных нейросетей-трансформеров с эффектом памяти, что возможно за счет использования графового представления расчетной области [107-110].

Задачи, поставленные перед исследованием, были выполнены, а именно:

1. Разработан валидный цифровой двойник печи ЭСП А-550, базирующийся на программной реализации решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных объемов. Применение цифрового двойника на базе численной модели является эффективным инструментом достоверного

прогнозирования состояния рабочей зоны печи, представляемых в виде числовых полей.

2. Достигнуто полное выпрямление тока в основной токоведущей цепи печи ЭШП А-550 за счет дооснащения тиристорным выпрямителем тока. Применение ЭШП на постоянном токе является экономически целесообразной тенденцией развития ЭШП с позиции энергоэффективности. Модификация ЭШП на постоянном токе прямой полярности с вращением тела расходуемого электрода демонстрирует наивысшие показатели энергоэффективности и производительности переплава, составляющие 24% и 34% соответственно, относительно ЭШП на переменном токе.

3. Применение вращения тела расходуемого электрода при ЭШП эффективно устраняет дефект послойной кристаллизации металла и является обязательной модификацией печей ЭШП на постоянном токе с несимметричным токоподводом.

4. ЭШП на постоянном токе на примере стали марки 30ХМА не приводит к изменению химического состава получаемых стальных слитков в пределах требований ГОСТ 4543-2016.

5. В сравнении с ЭШП на переменном токе ЭШП на постоянном токе увеличивает интенсивность удаления кислорода (до 71%) из металла и делает принципиально возможным удаление водорода (до 11%) при ЭШП без применения вакуумирования. Кроме того, интенсифицируется процесс удаления серы (до 37%) и азота (до 22%). Применение ЭШП всех исполнений повсеместно снижает концентрацию НВ, однако в части оксидов наблюдается значительное дробление исходных частиц, провоцирующее рост их общего числа и линейную плотность.

Цель данного диссертационного исследования, заключающаяся в исследовании влияния постоянного тока при ЭШП со стационарным и вращающимся телом расходуемого электрода на изменение характера формирования слитка, его химического состава и рафинирующую способность переплава, а также на технико-экономические показатели производительности

ЭШП на постоянном токе в сравнении с технологией ЭШП на переменном токе, была достигнута, о чем свидетельствуют полученные результаты работы. Основные результаты работы были внедрены в учебный процесс подготовки студентов-бакалавров и студентов-магистров по направлениям 22.03.02 и 22.04.02 «Металлургия» в филиале ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте. Подтверждающая справка представлена в приложении В.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭШП	электрошлаковый переплав
СЭМ	специальная электрометаллургия
РЭ	расходуемый электрод
ШВ	шлаковая ванна
МВ	металлическая ванна
ВК	водоохлаждаемый кристаллизатор
НВ	неметаллические включения
ВП	вредные примеси
CFD	вычислительная гидродинамика
ДСП	дуговая сталеплавильная печь
ЭШС	электрошлаковая сварка
ВДП	вакуумно-дуговая печь
ПТ	переменный ток
ВРЭ	наличие вращения тела расходуемого электрода
ПТПП	постоянный ток прямой полярности
ПТОП	постоянный ток обратной полярности
Э	электрод
К	край слитка
Ц	центр слитка

СПИСОК ТЕРМИНОВ

CFD-моделирование: Моделирование с помощью методов вычислительной гидродинамики.

активное сопротивление: Составляющая полного сопротивления цепи, возникающая при электрическом токе через проводник.

бифилярная схема: Конструктивная особенность ЭШП, при которой основная токоведущая цепь проходит между несколькими электродами.

валидация: Процедура установления соответствия модели и ее оригинала.

гомогенность: Однородность состава.

десульфурация: Процесс удаления серы и сульфидов.

Джоулево тепло: Теплота, выделяющаяся в проводнике с током по закону Джоуля-Ленца.

жидкий старт: Технологическая особенность ЭШП, при которой пуск печи осуществляется при жидкой шлаковой ванне.

изотропность: Постоянство свойств по всему объему.

магнитное дутье: Явление нарушения соосности потока заряженных частиц при пересечении магнитных полей, возникающее в жидких и газообразных проводниках при несимметричном токоподводе постоянного тока.

межэлектродный промежуток: Наикратчайшее расстояние между поверхностями электродов или между электродом и поверхностью металлической ванны.

металлическая ванна: Объем расплавленного металла между шлаковой ванной и фронтом кристаллизации слитка.

монофилярная схема: Конструктивная особенность ЭШП, при которой основная токоведущая цепь проходит через расходуемый электрод и поддон печи.

пинч-эффект: Явление удержания соосности потока заряженных частиц собственным магнитным полем, возникающее в жидких и газообразных проводниках при симметричном токоподводе постоянного тока.

поле гравитационных сил: Физическое поле, через которое осуществляется притяжение между всеми телами, обладающими массой.

поле электромагнитных сил: Физическое поле, взаимодействующее с электрически заряженными телами.

подэлектродная зона: Область шлаковой ванны между телом расходуемого электрода и металлической ванной, располагающаяся непосредственно под торцом расходуемого электрода.

пондеромоторная сила: Сила, возникающая при наличии постоянного магнитного поля.

раскисление: Процесс удаления кислорода и оксидов.

расходуемый электрод: Электрод, тело которого переплавляется в формируемый слиток.

расчетная сетка: Компонент численной модели, описывающий пространственную область исследуемого процесса или явления.

реактивное сопротивление: Составляющая полного сопротивления цепи, возникающая при изменении полярности электрического тока в проводнике.

резистивный источник выделения теплоты: Излучающий источник теплоты по закону Джоуля-Ленца при прохождении электрического тока через него.

сила Ампера: Сила, являющаяся проявлением природы магнитной составляющей электромагнитного поля и действующая на проводник тока.

сила Лоренца: Сила, являющаяся проявлением природы магнитной составляющей электромагнитного поля и действующая на элементарный заряд.

симметричный тоководвод: Тип подключения разнополюсных электрических проводников, при котором соблюдается симметричность их расположения относительно геометрической оси.

твердый старт: Технологическая особенность ЭШП, при которой пуск печи осуществляется с помощью затравочных материалов и включает полного расплавления флюса перед рабочим ходом печи.

тепловой центр: Точка или область пространства в объеме шлаковой ванны, выделяющая наибольшее количество теплоты.

флуктуации: Отклонения.

фронт кристаллизации: Объемная граница перехода вещества из жидкого агрегатного состояния в твердое.

цифровой двойник: Виртуальная модель процесса или явления с достаточной полнотой детализации природы признаков и поведения оригинала.

численная модель: Программная реализация решения задачи с помощью численных методов

шлаковая ванна: Объем шлака над металлической ванной.

«штырь-трубка»: Эффект, возникающий при помещении тела одного электрического проводника в полость другого при несимметричном токоподводе постоянного тока.

ЭШП прямой полярности: Тип токоподвода, при котором анодом выступает водоохлаждаемый кристаллизатор, а катод располагается на электроде.

ЭШП обратной полярности: Тип токоподвода, при котором анодом выступает тело электрода, а катод располагается на водоохлаждаемом кристаллизаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуманов, И. В. Пути повышения технологичности и экономической эффективности электрошлаковых технологий / И. В. Чуманов // Физико-химические основы металлургических процессов (фхомп 2022) : сборник трудов конференции (г. Выкса, 10–14 октября 2022 г.). – Выкса: АО "Выксунский металлургический завод", 2022. – С. 64-67.
2. Медовар, Б. И., Латаш Ю.В. Электрошлаковый переплав / Б. И. Медовар, Ю. В. Латаш [и др.]. – Москва : Металлургия, 1963. – 170 с.
3. Дакуорт, У. Э., Хойл Дж. Электрошлаковый переплав / У. Э. Дакуорт, Дж. Хойл. – Москва : Металлургия, 1973. – 192 с.
4. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода : автореф. дис. ... док. тех. наук: 05.16.02 / И. В. Чуманов ; ЮУрГУ. – Челябинск. 2002. – 40 с.
5. Электронная плавка металла / Г. Ф. Заборонок, Т. И. Зеленцов, А. С. Ронжин [и др.]. – Москва : Металлургия, 1965. – 291 с.
6. Ключев, М. М., Волков С. Е. Электрошлаковый переплав / М. М. Ключев, С. Е. Волков. – Москва : Металлургия, 1984. – 208 с.
7. Чуманов, И. В., Пятыгин, Д. А. Влияние пондеромоторных сил на расплав / И. В. Чуманов, Д. А. Пятыгин // Материалы научной конференции «Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов» (г. Курган, 14-17 октября 2008 г.), – Курган: Изд-во КГУ, 2008. – С. 64-65.
8. Селиверстов, Д. А., Пятыгин, Д. А., Чуманов И. В. К вопросу экономической целесообразности перевода печей ВДП в печи ЭШП на постоянном токе / Д. А. Селиверстов, Д. А. Пятыгин, И. В. Чуманов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 1. – С. 24-26.
9. Миронов, Ю. М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей : Учебное пособие / Ю. М. Миронов. – Чебоксары : Изд-во ЧувГУ им. И. Н. Ульянова. 1997. – 232 с.

10. Миронов, Ю. М., Михадаров, Д. Г. Влияние межэлектродного промежутка на отклонение столба дуги / Ю. М. Миронов, Д. Г. Михадаров // Вестник Чувашского университета. – 2009. – № 2. – С. 139-142.

11. Миронова, А. Н., Миронов, Ю. М. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей : Учебное пособие / А. Н. Миронова, Ю. М. Миронов. – Чебоксары: Изд-во ЧувГУ им. И. Н. Ульянова. 1999. – 154 с.

12. Есин, О. А., Гельд, П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Взаимодействие жидкостей с газами и твердыми фазами / О. А. Есин, П. В. Гельд. – Свердловск : Metallurgizdat, 1966. – 703 с.

13. Авторское свидетельство № 309956 СССР. Способ электрошлакового переплава / Г. А. Вачугов, Г. А. Хасин, О. М. Чехомов [и др.] // Оpubл.: Спец. Электromеталлургия. – 1982. – № 49. – С. 7-8.

14. Чуманов, И. В., Пятыхин, Д. А., Рошин, В. Е. Особенности электрошлакового процесса на постоянном токе с вращением электрода / И. В. Чуманов, Д. А. Пятыхин, В. Е. Рошин // Материалы научной конференции «XI международная конференция «Современные проблемы электromеталлургии стали» (г. Челябинск, 25-27 сентября 2001 г.) – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С. 117-118.

15. Пятыхин, Д. А., Чуманов, И. В. Влияние рода тока и скорости вращения расходуемого электрода на механические свойства электрошлакового металла / Д. А. Пятыхин, И. В. Чуманов // Вестник ЮУрГУ. Серия: металлургия. – 2011. – № 14. – С. 40-44.

16. Чуманов, И. В., Пятыхин, Д. А. Влияние рода тока и скорости вращения электрода при ЭШП на химический состав стали / И. В. Чуманов, Д. А. Пятыхин // Вестник ЮУрГУ. Серия: металлургия. – 2010. – №34. – С. 13-15.

17. Патент № 189750 Российская Федерация, СПК С22В 9/18 (2019.02), В22D 23/10 (2019.02). Электрошлаковая печь для получения полого слитка : № 2018147757 : заявлено 29.12.2018 : опубликовано 03.06.2019 / И. В. Чуманов, Д. В. Сергеев, В. Н. [и др.] ; патентообладатель ЮУрГУ. – 7 с. : ил.

18. Чуманов, И. В., Матвеева, М. А., Сергеев, Д. В. Влияние центробежных сил на структуру слитка ЭШП, полученного переплавом на постоянном токе / И. В. Чуманов, М. А. Матвеева, Д. В. Сергеев // *Электрометаллургия*. – 2022. – № 12. – С. 15-20.

19. Протокилов, И. В., Порохонько В. Б. Физическое моделирование процесса плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия / И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько // *Современная электрометаллургия*. – 2015. – № 1. – С. 8-12.

20. Протокилов, И. В., Порохонько В. Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей / И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько // *Современная электрометаллургия*. – 2017. – № 3. – С. 9-14.

21. Protokovilov, I., Nazarchuk, A., Porohonko, V. ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification / I. Protokovilov, A. Nazarchuk, V. Porohonko // Conference «Medovar memorial symposium» (Kyiv, June 7-10, 2016). – Kyiv: EWI Press, 2016. – P. 110-115.

22. Протокилов, И. В., Назарчук А. Т., Петров Д. А. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП / И.В. Протокилов, А.Т. Назарчук, Д.А. Петров [и др.] // *Современная электрометаллургия*. – 2015. – № 4. – С. 3-8.

23. Дуб, А. В., Левков, Л. Я., Шурыгин, Д. А. Перспективы производства оборудования для АЭС с использованием ЭШП / А. В. Дуб, Л. Я. Левков, Д. А. Шурыгин [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: обеспечения безопасности АЭС*. – 2014. – № 34. – С. 11-18.

24. Патент № 2479649 Российская Федерация, МПК C22B 9/18 (2006.01). Способ электрошлакового переплава : № 2011141977/02 : заявлено 18.10.2011 : опубликовано 20.04.2013 / В. С. Дуб, А. В. Дуб, С. О. Соколов [и др.] ; патентообладатель Минпромторг России. – 4 с. : ил.

25. Абрамов, А. В., Ильгачев, А. Н. Принципы построения системы управления электрическим режимом установки импульсно-электрошлакового

переплава / А. В. Абрамов, А. Н. Ильгачев // Вестник Чувашского университета. – 2009. – № 2. – С. 92-97.

26. Абрамов, А. В., Михадаров, Д. Г., Исследование тока кристаллизатора при импульсном электрошлаковом переплаве / А. В. Абрамов, Д. Г. Михадаров // Вестник Чувашского университета. – 2008. – № 2. – С. 66-68.

27. Шарапов, А. А., Родионова, И. Г., Ябуров, С. И. Этапы развития российской специальной электрометаллургии / А. А. Шарапов, И. Г. Родионова, С. И. Ябуров [и др.] // Электрометаллургия. – 2014. – № 4. – С. 3-8.

28. Dilawari, A. H., Szekely, J. Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Refining / A. H. Dilawari, J. Szekely // Metallurgical transactions B. – 1978. – Vol. 9B. – P. 77-87.

29. Choudhary, M., Szekely, J., Medovar, B. I. The Velocity Field in the Molten Slag Region of ESR Systems: a Comparison of Measurements in a Model System with Theoretical Predictions / M. Choudhary, J. Szekely, B. I. Medovar [et al.] // Metallurgical transactions B. – 1982. – Vol. 13B. – P. 35-43.

30. Kelkar, K. M., Mok, J., Patankar, S. V. Computational modeling of electros slag remelting processes / K. M. Kelkar, J. Mok, S. V. Patankar [et al.] // Journal Physique IV. – 2004. – Vol. 120. – P. 421-428.

31. Kharicha, A., Mackenbrock, A., Ludwig, A. Selected Numerical Investigations on ESR Process / A. Kharicha, A. Mackenbrock, A. Ludwig [et al.] // Proceedings of the International Symposium «Liquid Metal Processing and Casting» (Nancy, 2007). – Nancy: Wiley-TMS, 2007. – P. 107.

32. Kharicha, A., Ludwig, A. Liquid-Liquid Interface Instability in the Electro-Slag Remelting Process / A. Kharicha, A. Ludwig // International Scientific Colloquium «Modelling for Material Processing» (Riga, September 16-17, 2010). – Riga: UL Press, 2010. – P. 207-212.

33. Kharicha, A., Schutzenhofer, W., Ludwig, A. On the importance of Electric Currents Flowing into the Mould during an ESR Process / A. Kharicha, W. Schutzenhofer, A. Ludwig [et al.] // Steel research international. – 2008. – Vol. 79. – № 8. – P. 632-636.

34. Kharicha, A., Karimi-Sibaki, E., Wu, M. Contribution Of The Mould Current To The Ingot Surface Quality In The Electroslag Remelting Process / A. Kharicha, E. Karimi-Sibaki, M. Wu [et al.] // Proceedings of the International Symposium «Liquid Metal Processing & Casting» (Austin, September 22-25, 2013). – Hoboken: Wiley-TMS, 2013. – P. 95-99.
35. Kharicha, A., Wu, M., Ludwig, A. Simulation of the Electric Signal During the Formation and Departure of Droplets in the Electroslag Remelting Process / A. Kharicha, M. Wu, A. Ludwig // Metallurgical and materials transactions B. – 2016. – Vol. 47. – P. 1427-1434.
36. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. A numerical study on electrochemical transport of ions in calcium fluoride slag / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, M. Wu [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 143. – P. 1-8.
37. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. Confrontation of the Ohmic approach with the ionic transport approach for modeling the electrical behavior of an electrolyte / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, M. Wu [et al.] // Ionics. – 2018. Vol. 24. – P. 2157–2165.
38. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. Toward Modeling of Electrochemical Reactions during Electroslag Remelting (ESR) Process / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, M. Wu [et al.] // Steel Research International. – 2017. – Vol. 87. – P. 1-8.
39. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. A Numerical Investigation on the Electrochemical Behavior of CaO and Al₂O₃ in the ESR Slags / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, M. Wu [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2020. Vol. 51. – P. 871-879.
40. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Vakhrushev, A. Investigation of effect of electrode polarity on electrochemistry and magnetohydrodynamics using tertiary current distribution in electroslag remelting process / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, A. Vakhrushev [et al.] // Journal of Iron and Steel Research International. – 2021. – Vol. 28. – P. 1551-1561.

41. Karimi-Sibaki, E., Kharicha, A., Wu, M. Review on Modeling and Simulation of Electroslag Remelting / E. Karimi-Sibaki, A. Kharicha, M. Wu [et al.] // *Steel Research International*. – 2018. – Vol. 89. – P. 1-20.

42. Wang, F., Li, B., Gao, T. Analysis of Electromagnetic Field and Temperature Field in ESR Process with Three Electrodes / F. Wang, B. Li, T. Gao // *Proceedings of The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing «The Minerals, Metals & Materials Society»* (Waikoloa, August 4-9, 2013). – Waikoloa : Wiley-TMS, 2013. – P. 3091-3098.

43. Wang, F., Wang, Q., Liu Y. Investigation of Heat Transfer and Magnetohydrodynamic Flow in Electroslag Remelting Furnace Using Vibrating Electrode / F. Wang, Q. Wang, Y. Liu [et al.] // *JOM*. – 2016. – Vol. 68. – P. 410-420.

44. Wang, Q., Gosselin, L., Li, B. Effect of Rotating Electrode on Magnetohydrodynamic Flow and Heat Transfer in Electroslag Remelting Process / Q. Wang, L. Gosselin, B. Li // *ISIJ International*. – 2014. – Vol. 54. – №. 12, – P. 2821–2830.

45. Wang, Q., Wang, F., Li, B. A Three-Dimensional Comprehensive Model for Prediction of Macrosegregation in Electroslag Remelting Ingot / Q. Wang, F. Wang, B. Li [et al.] // *ISIJ International*. – 2015. – Vol. 55. – № 5, – P. 1010–1016.

46. Wang, Q., Li, G., He, Z. A three-phase comprehensive mathematical model of desulfurization in electroslag remelting process / Q. Wang, G. Li, Z. He [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 114. – P. 874-886.

47. Wang, Q., He, Z., Li, G. Numerical investigation on species transport in electroslag remelting dual alloy ingot / Q. Wang, Z. He, G. Li [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 103. – P. 419–427.

48. Хаукинс, Р. Дж., Суинден, Д. Дж., Поклингтон, Дж. Лабораторные опыты и контроль химического состава металла ЭШП в промышленных условиях / Р. Дж. Хаукинс, Д. Дж. Суинден, Дж. Поклингтон // *Электрошлаковый переплав*. – 1974. № 2. – С. 47-78.

49. Суцумото, Т., Сугихара, Т. Качество стали ЭШП / Т. Суцумото, Т. Сугихара // *Электрошлаковый переплав*. – 1975. – № 3. – С. 128-134.

50. Kato, M., Hasegawa, K., Nomura, S. Transfer of oxygen and sulfur during direct current electroslag remelting / M. Kato, K. Hasegawa, S. Nomura [et al.] // Transactions ISIJ. – 1983. – Vol. 23. – № 7. – P. 618-627.

51. Wang, Q., Liu, Y., He, Z. Numerical analysis of effect of current on desulfurization in electroslag remelting process / Q. Wang, Y. Liu, Z. He [et al.] // ISIJ International. – 2017. – Vol. 57. – № 2. – P. 329-336.

52. Paar, A., Schneider, R., Zeller, P. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process / A. Paar, R. Schneider, P. Zeller [et al.] // Proceedings of the International Symposium «Liquid Metal Processing & Casting» (Austin, September 22–25, 2013). – Hoboken: Wiley, 2013. – P. 29-36.

53. Paar, A., Schneider, R., Zeller, P. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting / A. Paar, R. Schneider, P. Zeller [et al.] // Steel Research Int. – 2014. – Vol. 85. – № 4. – P. 570–578.

54. Shi, X., Wang, B., Wang, Y. Effect of Different Power Supply Modes on Inclusion in 304L Stainless Steel Electroslag Ingot. / X. Shi, B. Wang, Y. Wang [et al.] // Metals. – 2023. – Vol. 13. – P. 457-469.

55. Young, E. C. Mitchell, A. Some Aspects of Nitrogen Addition and Removal During Special Melting and Processing of Iron and Nickel Base-Alloys / A. Mitchell, E. C. Young // High Temperature Materials and Processes. – 2001. – Vol. 20. – № 2. – P. 79-101.

56. Holt, R. T., Wallace, W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys / R. T. Holt, W. Wallace // International Metals Reviews. – 1976. – Vol 21. – P. 1-24.

57. Chen, F., Huang, X., Wang, Y. Investigation on foam ceramic filter to remove inclusions in revert superalloy / F. Chen, X. Huang, Y. Wang [et al.] // Materials Letters. – 1998. – Vol. 34. – P. 372-376.

58. Ali, M., Eissa, M., El Faramawy, H. Electroslag Refining of CrNiMoWMnV Ultrahigh-Strength Steel / M. Ali, M. Eissa, H. El Faramawy [et al.] // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2017. – Vol. 5. – P. 385-407.

59. Dong, Y., Jiang, Z., Liang, L. Hydrogen permeability of slags containing calcium fluoride / Y. Dong, Z. Jiang, L. Liang [et al.] // Journal of Central South University of Technology. – 2011. – Vol. 18. – P. 1063-1067.

60. Yan, C., Li, Y., Ma, B. Control of Hydrogen During ESR Process / C. Yan, Y. Li, B. Ma // Journal of Iron and Steel Research International. – 2013. – Vol. 20. – P. 7-11.

61. Xiaohua, W., Ying, L. Experimental Investigation on the Evolution of Hydrogen in Steel during the Electros slag Remelting Process / W. Xiaohua, L. Ying // Materials Research. – 2019. – Vol. 22. – P. 205-209.

62. Dong, Y. W., Jiang, Z. H., Liang, L. K. Hydrogen Pick-Up During Electros slag Remelting Process / Y. W. Dong, Z. H. Jiang, L. K. Liang [et al.] // Journal of Iron and Steel Research International. – 2011. – Vol. 18. – P. 19-23.

63. Король, Б. Б. Влияние межфазного натяжения на скорость удаления включений из стали / Б. Б. Король // Теория металлургических процессов. – Москва : Металлургия. – 1969. – № 5. – С. 104-108.

64. Попель, С. И., Дерябин, А. А. Факторы, влияющие на скорость всплывания включений в стали / С. И. Попель, А. А. Дерябин // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1965. – № 4. – С. 25-32.

65. Попель С. И. Интенсивность зарождения и укрупнения неметаллических включений в стали / С. И. Попель // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1962. – № 4. – С. 5-18.

66. Левков, Л. Я. Теоретические предпосылки и практические методы управления физико-химическими и теплофизическими процессами при электрошлаковом переплаве, определяющие качество ответственных изделий : специальность 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Левков Леонид Яковлевич. – Москва, 2015. – 22 с.

67. Цыкуленко, К. А. Разработка и исследование специальных способов производства высокопрочной стали ЭШП с регламентированными свойствами : специальность 05.16.07 "Металлургия техногенных и вторичных ресурсов" :

автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Цыкуленко Константин Анатольевич. – Киев, 2000. – 21 с.

68. Поволоцкий, Д.Я., Рощин В.Е., Гречин Р.И. Удаление неметаллических включений при рафинирующих переплавах //Изв. АН СССР, Металлы. – 1974. – № 3. –С. 46-50.

69. Влияние вращения переплавляемого электрода на удаление неметаллических включений при ЭШП /В.М. Дьяконов, Г.А. Вачугов, Г.А. Хасин и др. Пробл. спец. электрометаллургии. – 1976, – Вып. 29. – С. 21-25.

70. 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.

71. Чуманов, И. В., Лутков, В. Н., Сергеев Д. В. Разработка комплекса оборудования для ЭШП и апробация холодной модели / И.В. Чуманов, В.Н. Лутков, Д.В. Сергеев // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2018. – № 17. – С. 48-52.

72. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Теоретическая физика : Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 4-е изд., перераб. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 736 с.

73. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 4-е изд., стереот. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : ФИЗМАТЛИТ. 2015. – 656 с.

74. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В. Программный инструмент для прогнозирования физико-химических свойств и металлической структуры материалов, получаемых в печах специальной и традиционной электрометаллургии / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов // Материалы научной конференции «Импортозамещение в металлургии и металлургическом машиностроении» (г. Москва, 18-20 октября 2022 г.) – Москва: Изд-во НИТУ МИСиС, 2022. – С. 142-148.

75. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611791 Российская Федерация. Программа для определения скорости потока

токопроводящей жидкости в наведенном постоянном магнитном поле методом конечных элементов в двухмерном пространстве : № 2021610820 : заявлено 01.02.2021 : зарегистрировано 05.02.2021 / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, Д.В. Сергеев [и др.] ; правообладатель ЮУрГУ – 1 с.

76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618185 Российская Федерация. Программа-решатель для определения поведения n -го числа несмешивающихся сжимаемых жидкостей с возможностью кристаллизации/плавления потока для неподвижных и движущихся сплошных сред : № 2021617269 : заявлено 14.05.2021 : зарегистрировано 24.05.2021 / И.А. Алексеев, И.В. Чуманов ; правообладатель ЮУрГУ – 1 с.

77. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619309 Российская Федерация. Программа-решатель стационарных электротермических задач : 2023617777 : заявлено 26.04.2023 : зарегистрировано 10.05.2023 / И.А. Алексеев, И.В. Чуманов ; правообладатель ЮУрГУ – 1 с.

78. Tassone, A. Magnetic induction and electric potential solvers for incompressible MHD flows / A. Tassone // – Gothenburg: CUT Press, 2017. – 59 p.

79. Swaminathan, C. R., Voller, V. R. A general enthalpy method for modeling solidification processes / C. R. Swaminathan, V. R. Voller // Metallurgical Transactions B. – 1992. – Vol. 23. – № 5. – P. 651-664.

80. Voller, V. R., Prakash, C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems / V. R. Voller, C. A. Prakash // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1987. – Vol. 30. – № 8. – P. 1709-1719.

81. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В., Аникеев, А. Н. Применение численного моделирования для анализа металлургических и литейных процессов / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов, А. Н. Аникеев // Материалы научной конференции «VIII международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021» (г. Екатеринбург, 17-21 мая, 2021 г.) – Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2021. – С. 714-715.

82. Жеребцов, С. Н., Чернышов, Е. А. Особенности физико-химических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава / С. Н. Жеребцов, Е. А. Чернышов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 228-235.

83. Биктагиров, Ф. К., Мищенко, Д. Д., Шаповалов, В. А. Физические свойства плавленного и агломерированного флюсов АНФ-6-1 / Ф. К. Биктагиров, Д. Д. Мищенко, В. А. Шаповалов [и др.] // Современная электрометаллургия. – 2017, – № 3, – С. 15-18.

84. Марочник сталей и сплавов : [сайт]. – URL: <https://www.splav-kharkov.com/> (дата обращения 01.02.2021).

85. ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation : [сайт]. – URL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm> (дата обращения 01.02. 2021).

86. Maric, T., Hopken, J., Mooney, K. The OpenFOAM Technology Primer / T. Maric, J. Hopken, K. Mooney. – Duisburg: Sourceflux UG. 2014. – 458 p.

87. Алексеев, И.А. Чуманов, И. В., Сергеев, Д. В. Численное моделирование процесса выделения теплоты в печи ЭШП на постоянном токе / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов, Д. В. Сергеев // Электрометаллургия. – 2023. – № 9. – С. 22-29.

88. Чуманов, И. В., Алексеев И. А., Сергеев Д. В. Моделирование поведения электромагнитных сил постоянного тока, действующих на каплю жидкого металла в процессе электрошлакового переплава / И. В. Чуманов, И. А. Алексеев, Д. В. Сергеев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 530-535.

89. Алексеев, И. А., Сергеев, Д. В. Влияние электромагнитных сил при ЭШП на постоянном токе / И. А. Алексеев, Д. В. Сергеев // Материалы научной конференции «Наука ЮУрГУ. Секция экономики, управления и права. (г. Челябинск, 21-23 апреля 2020 г.) – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2020. – С. 162-164.

90. Чуманов, И. В., Алексеев, И. А. Численное моделирование процесса капельного переноса металла при электрошлаковом переплаве на постоянном токе с применением метода конечных объемов / И. В. Чуманов, И. А. Алексеев // Материалы научной конференции «XVI международный конгресс

сталеплавильщиков и производителей металлов» (г. Екатеринбург, 24-28 мая 2021 г.) – Москва : ООО «РПК ПринтАП», 2021. – С. 163-168.

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

92. Борминский, С. А. Электротехника и электроника: Учеб. пособие / С. А. Борминский. – Самара : Изд-во СГАУ им. С. П. Королева, 2012. – 166 с.

93. Гордин, П. В., Росляков Е. М., Эвелеков В. И. Детали машин и основы конструирования: Учебное пособие / П. В. Гордин, Е. М. Росляков, В. И. Эвелеков. – Санкт-Петербург : Изд-во СЗТУ, 2006. – 186 с.

94. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В., Сергеев Д. В. Разработка технологии получения слитков при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов, Д. В. Сергеев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66. – № 5. – 623-630.

95. ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры». – Москва : Издательство стандартов, 1975. – 46 с.

96. ГОСТ 4543-2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия». – Москва : Стандартинформ, 2017. – 50 с.

97. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В. Разработка технологии ЭШП на постоянном токе с вращением электрода для получения слитка с высокими показателями изотропии физико-механических свойств и гомогенности химического состава / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов // Материалы научной конференции «XVII международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла» (г. Магнитогорск, 3-7 апреля 2023 г.). – Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2023. – С. 349-353.

98. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В. Удаление вредных примесей из стального расплава при ЭШП с вариациями токового режима / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2024. – № 23. – С. 63-68.

99. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В., Сергеев, Д. В. Разработка технологии получения слитков, обеспечивающей высокую изотропность физико-механических свойств без ухудшения химической чистоты и однородности структуры, при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов, Д. В. Сергеев // Материалы научной конференции «Научно-практическая школа для молодых металлургов» (г. Выкса, 18-22 сентября 2023 г.). – Выкса : Копировально-множительный центр АО "Выксунский металлургический завод", 2024. – С. 7-14.

100. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В. Разработка технологии ЭШП на постоянном токе для получения качественного по кристаллической структуре слитка с низким содержанием неметаллических включений и газов / И. А. Алексеев, И. В. Чуманов // Материалы научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 10-12 сентября 2024 г.). – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2024. – С. 211-218.

101. Рощин, В. Е., Рощин, А. В. Электрохимия восстановительных процессов и перспективы развития восстановительных технологий / В. Е. Рощин, А. В. Рощин // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2025. – Т. 68. № 4. – С. 424-433.

102. ГОСТ 17745-90 «Стали и сплавы. Методы определения газов». – Москва : Издательство стандартов, 1990. – 12 с.

103. ГОСТ 1778-2022 «Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений». – Москва : Российский институт стандартизации, 2023. – 52 с.

104. ГОСТ 5640-2020 «Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского». – Москва : Российский институт стандартизации, 2023. – 27 с.

105. Алексеев, И. А., Чуманов, И. В. Энергоэффективность печи ЭШП на постоянном токе с возможностью вращения тела расходуемого электрода / И. А.

Алексеев, И. В. Чуманов // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2025. – № 24. – С. 34-39.

106. Истомин, В. А., Шварц, Д. Р., Ишханов, Е. А. Использование метода SPH при моделировании гидродинамики в системе "ПолигонСофт" / В. А. Истомин, Д. Р. Шварц, Е. А. Ишханов [и др.] // Литейное производство. – 2012. – № 8. – С. 20-22.

107. Горбаченко, В. И. Нейрокомпьютеры в решении краевых задач теории поля. Кн. 10: Учебное пособие /В. И. Горбаченко. – Москва : Радиотехника, 2003. – 336 с.

108. Агеев, А. Д., Балухто, А. Н., Бычков, А. В. Нейроматематика. Кн. 6: Учебное пособие / А. Д. Агеев, А. Н. Балухто, А. В. Бычков [и др.]; Общая ред. А.И. Галушкина //. – Москва : ИПРЖР, 2002. – 448 с.

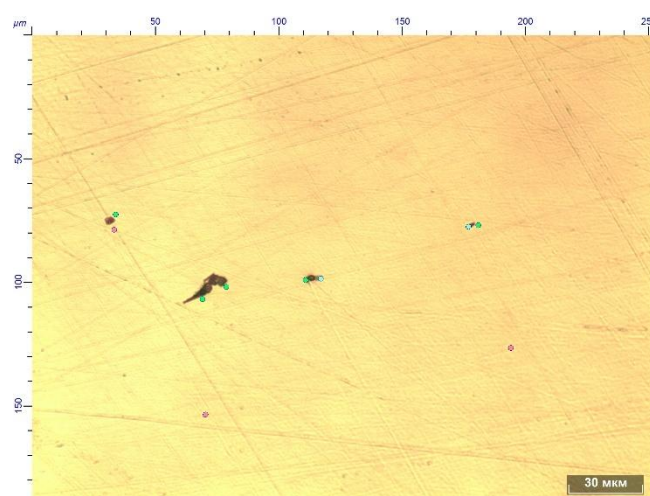
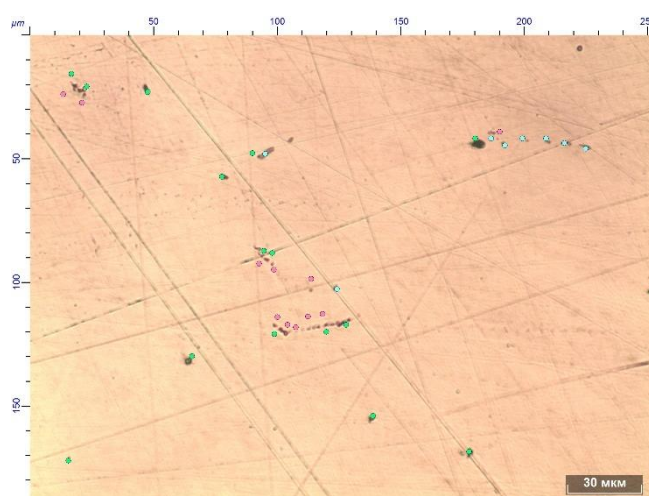
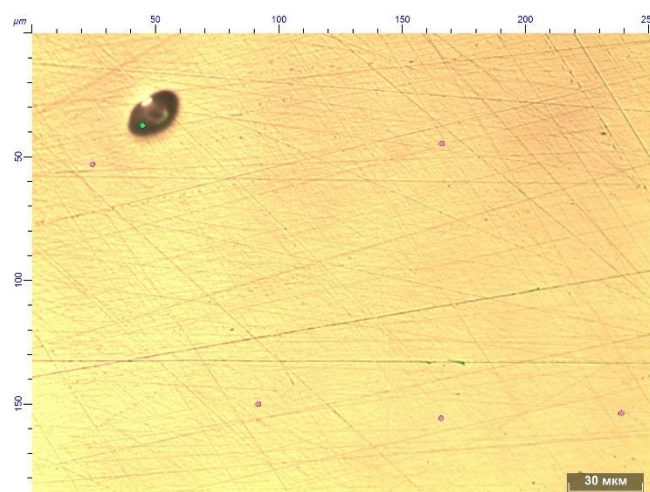
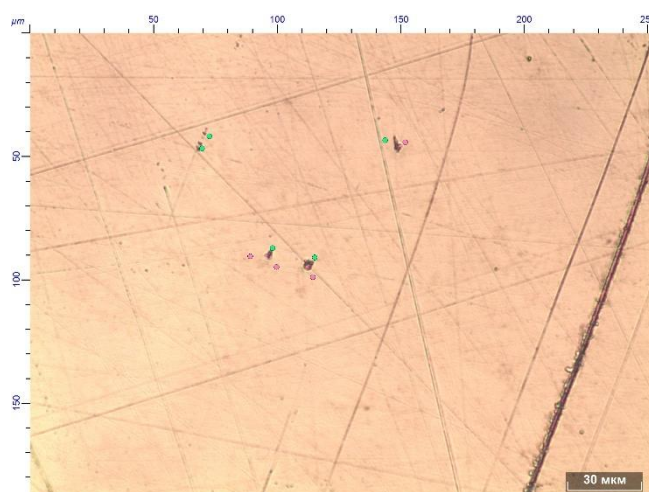
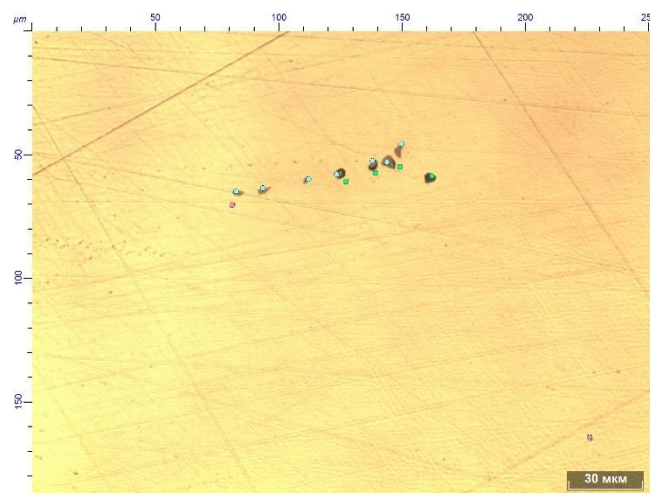
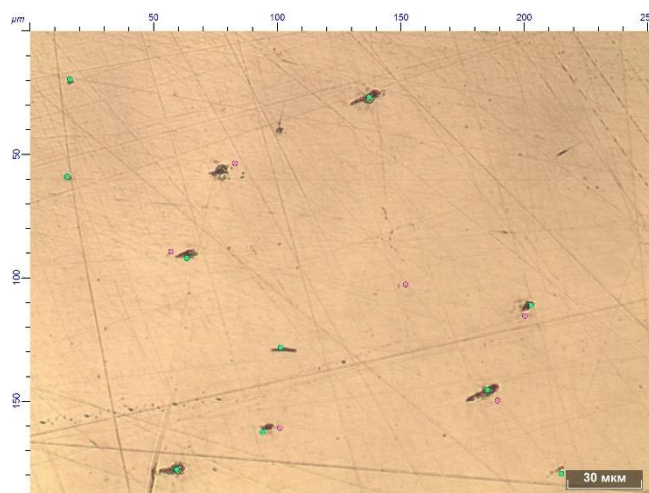
109. Kochkov, D., Smith, J. A., Alieva, A. Machine learning–accelerated computational fluid dynamics / D. Kochkov, J. A. Smith, A. Alieva [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2021. – Vol. 118. – №. 21. – P. 1-8.

110. Sanchez-Gonzalez, A., Godwin, J., Pfaff, T. Learning to simulate complex physics with graph networks / A. Sanchez-Gonzalez, J. Godwin, T. Pfaff [et al.] // Proceedings of the «International conference on machine learning» (Viena, July 12-18, 2020). – Red Hook : Curran Associates inc., 2020. – P. 8459-8468.

ПРИЛОЖЕНИЯ

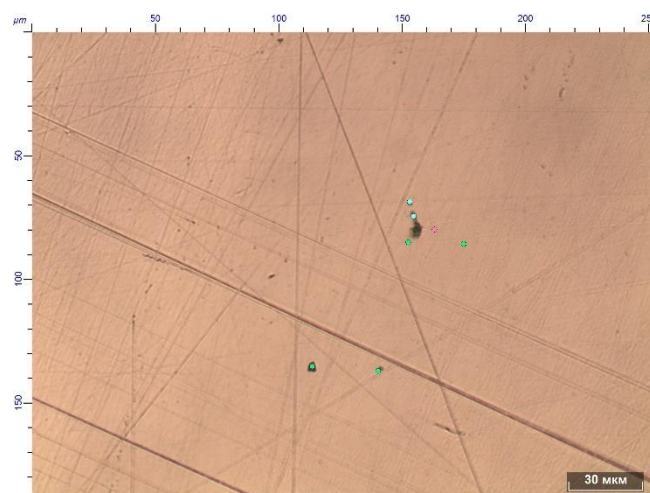
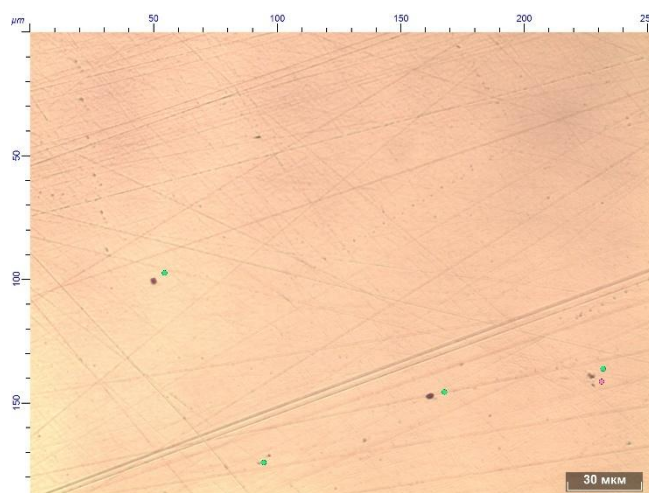
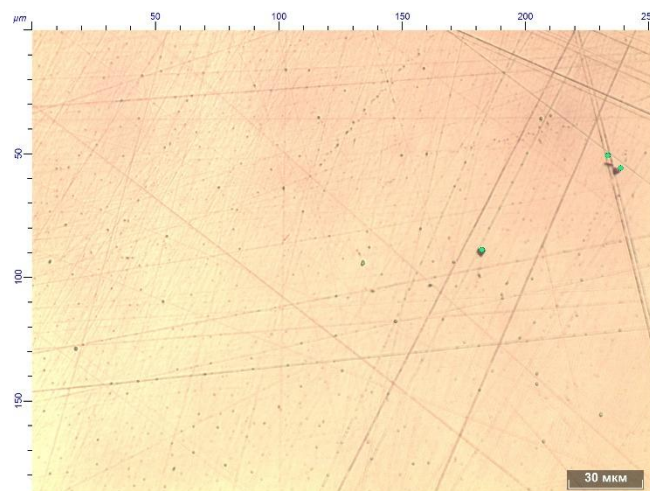
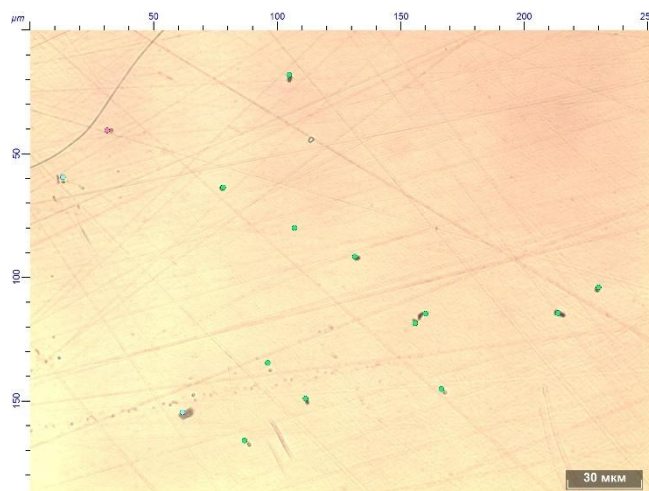
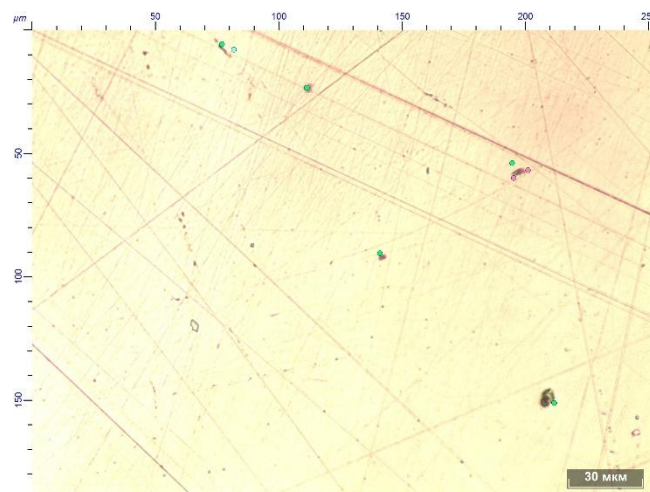
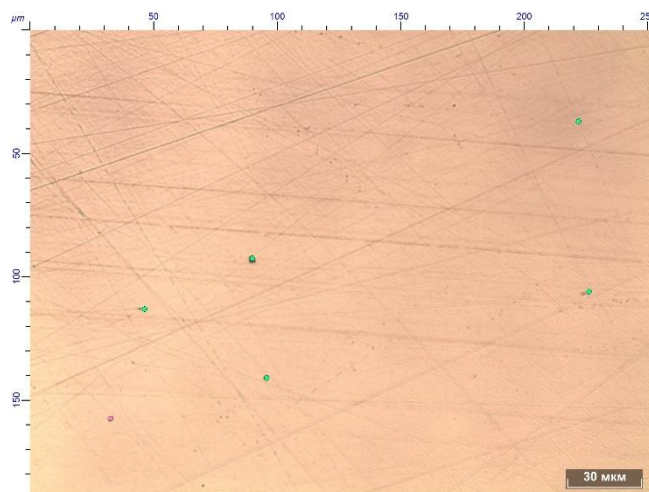
Приложение А

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (1 из 6)



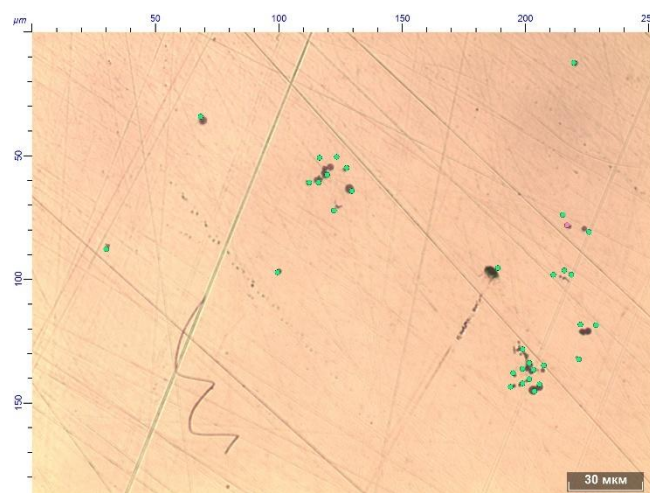
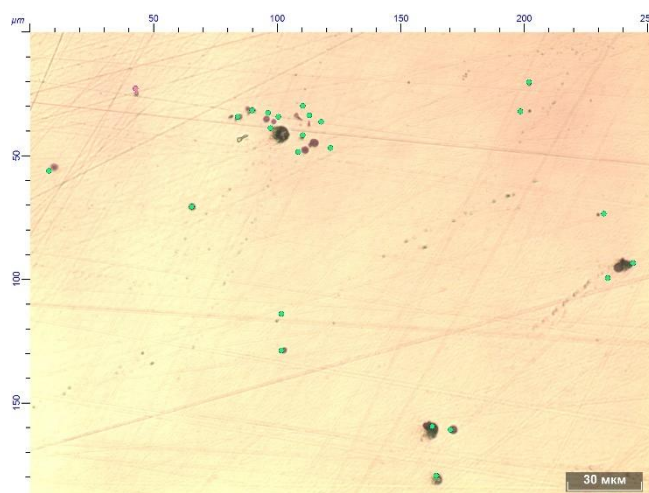
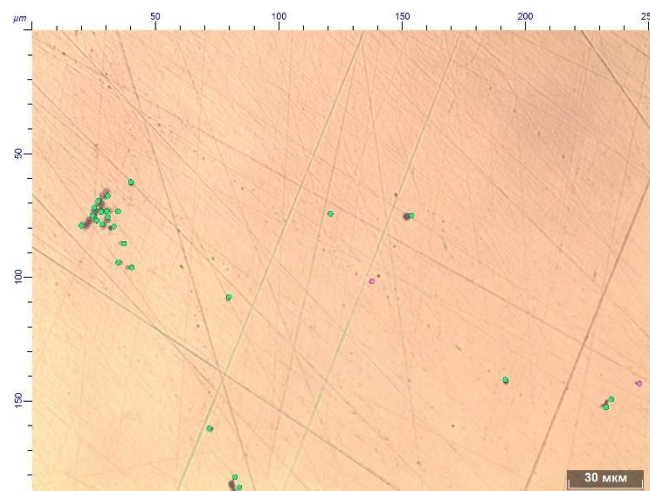
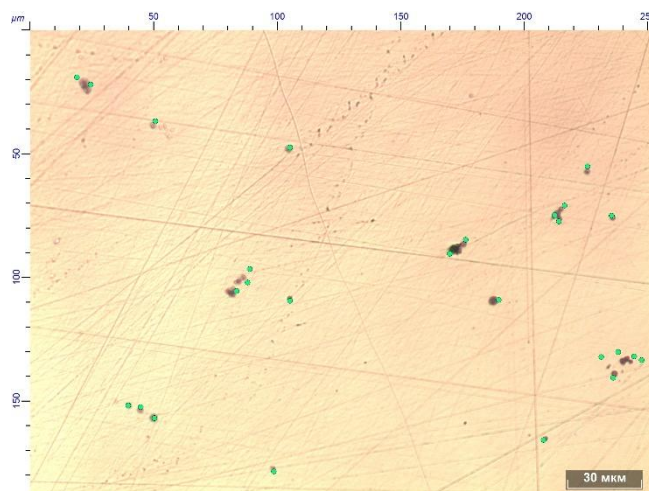
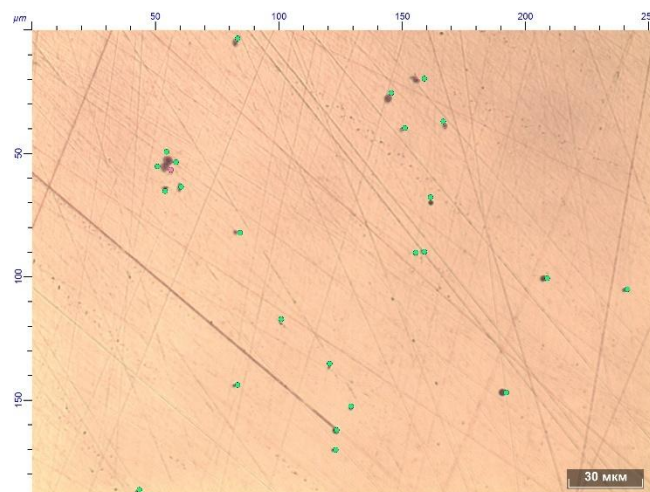
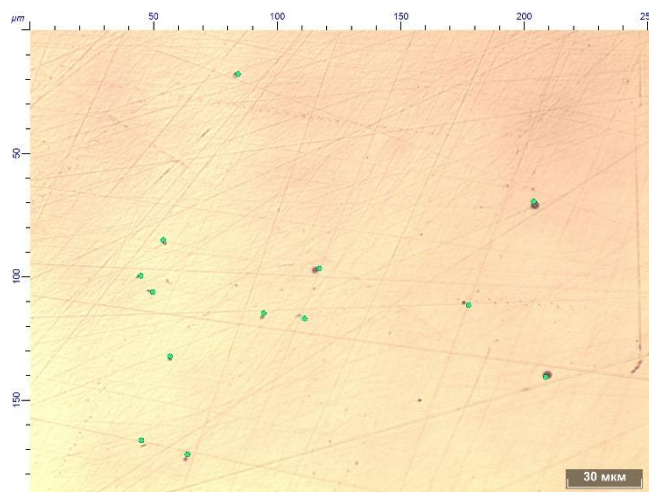
Переменный ток, периферия слитка

Переменный ток, центр слитка

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (2 из 6)

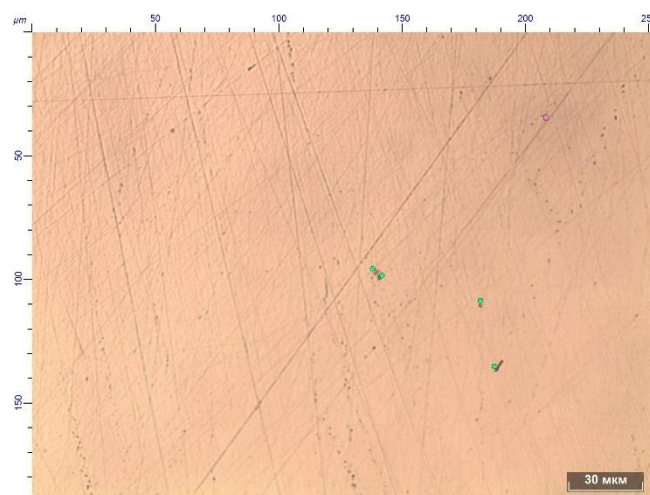
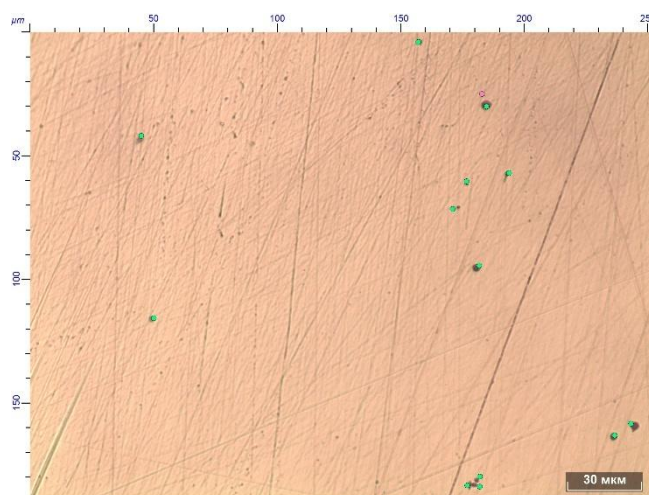
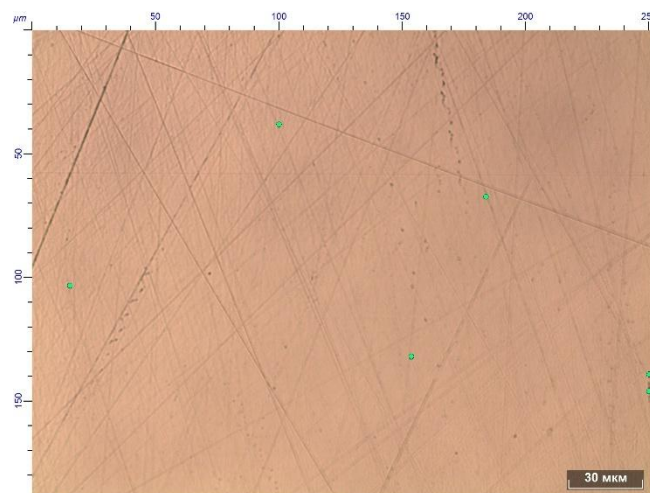
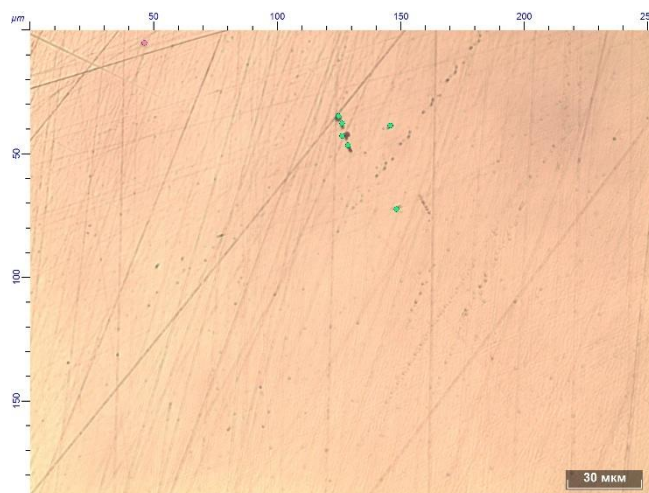
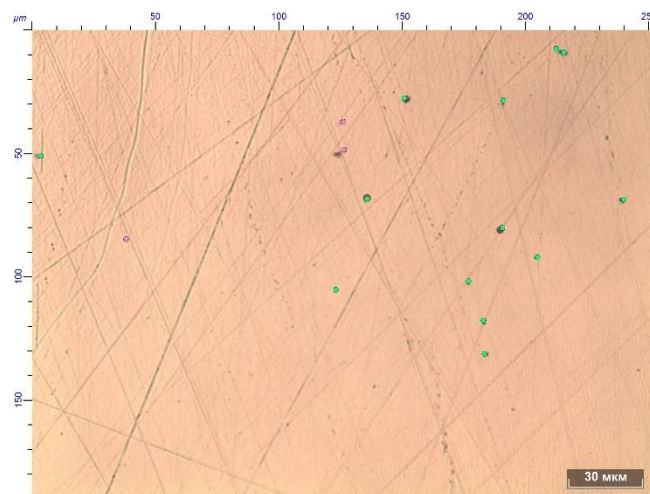
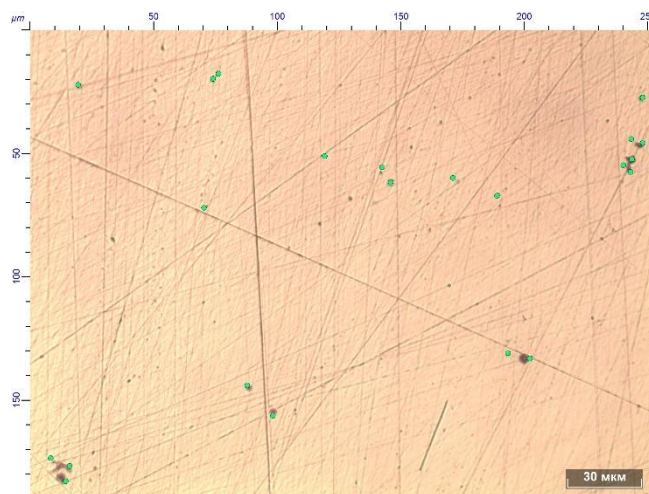
Переменный ток, вращение РЭ,
периферия слитка

Переменный ток, вращение РЭ, центр
слитка

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (3 из 6)

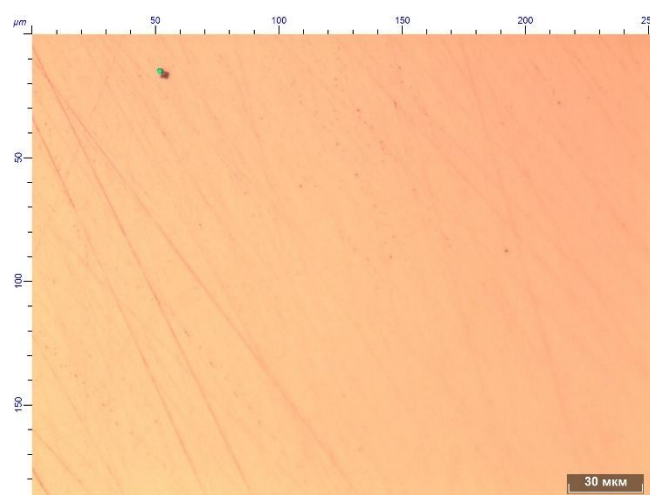
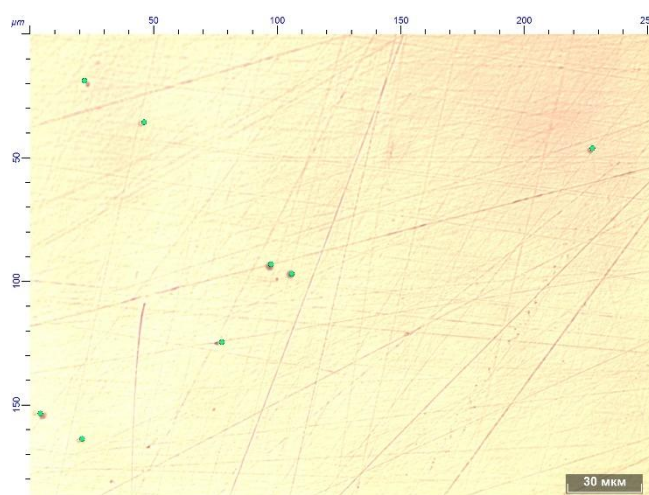
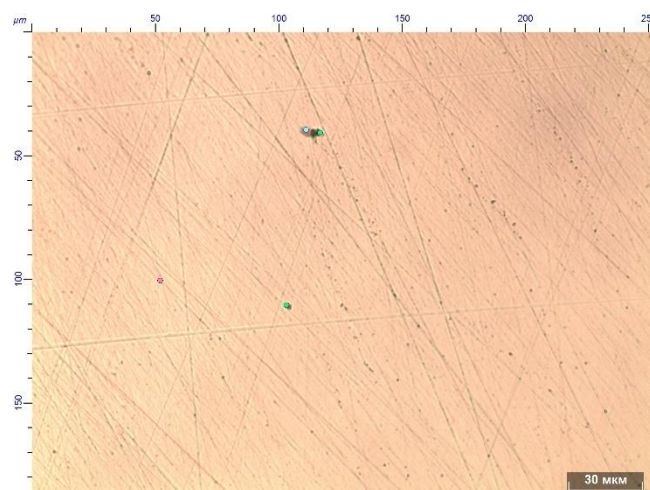
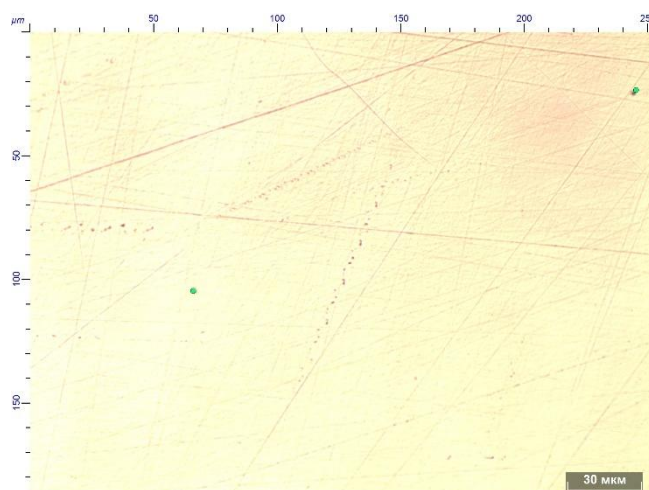
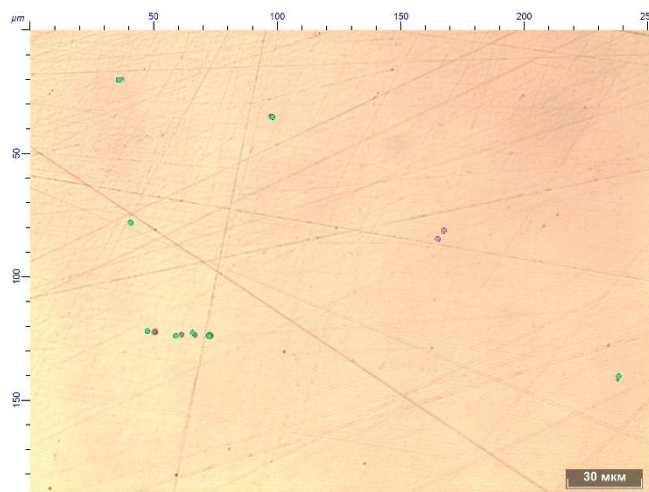
Постоянный ток прямой полярности,
периферия слитка

Постоянный ток прямой полярности,
центр слитка

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (4 из 6)

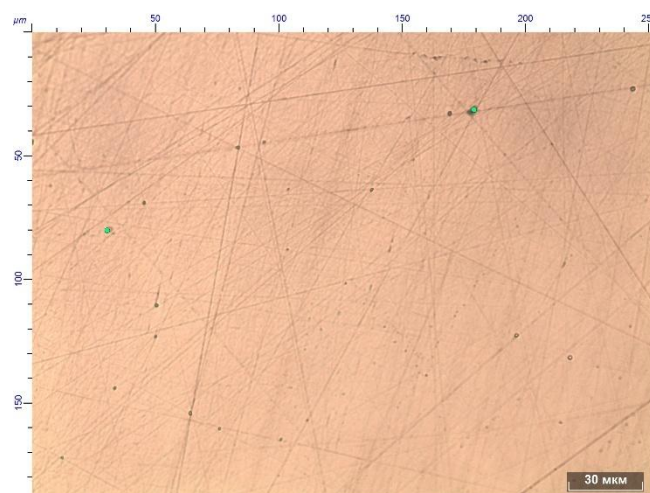
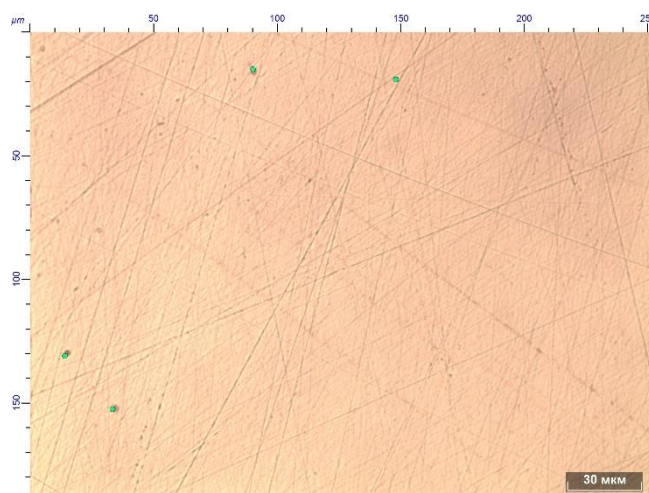
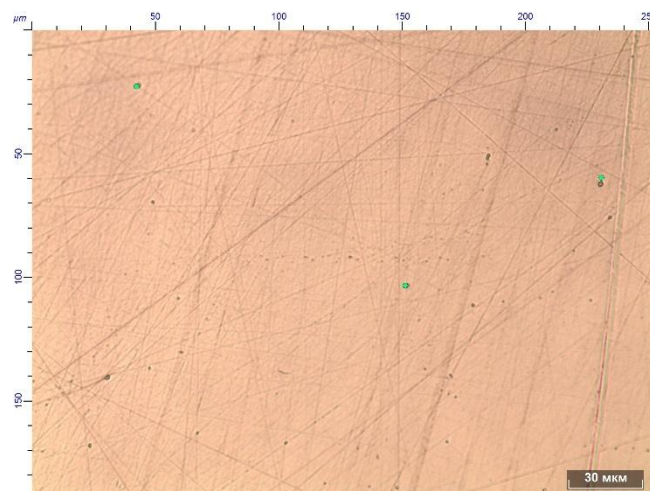
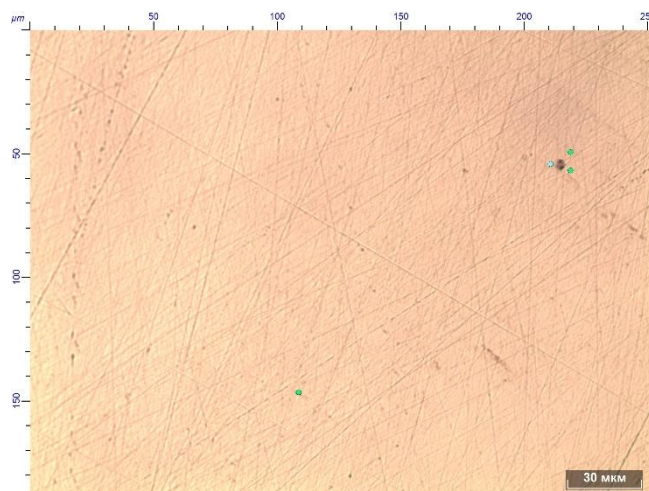
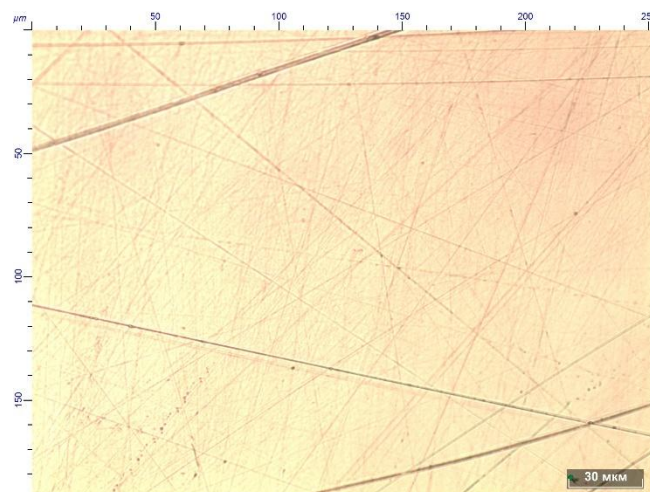
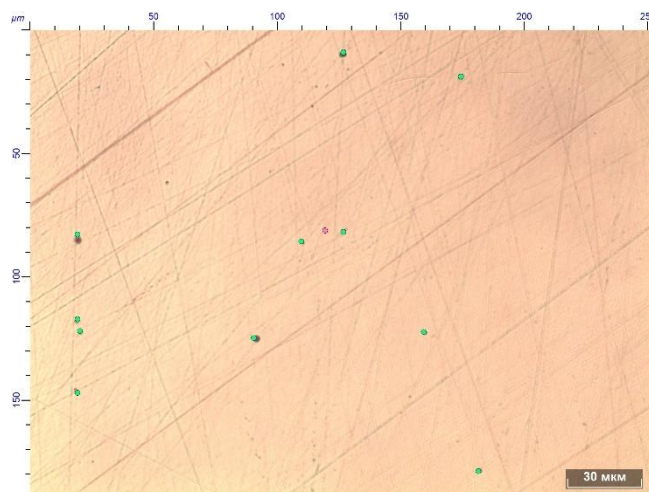
Постоянный ток прямой полярности,
вращение РЭ, периферия слитка

Постоянный ток прямой полярности,
вращение РЭ, центр слитка

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (5 из 6)

Постоянный ток обратной полярности,
периферия слитка

Постоянный ток обратной полярности,
центр слитка

Фотоснимки микрошлифов слитков ЭШП (6 из 6)

Постоянный ток обратной полярности,
вращение РЭ, периферия слитка

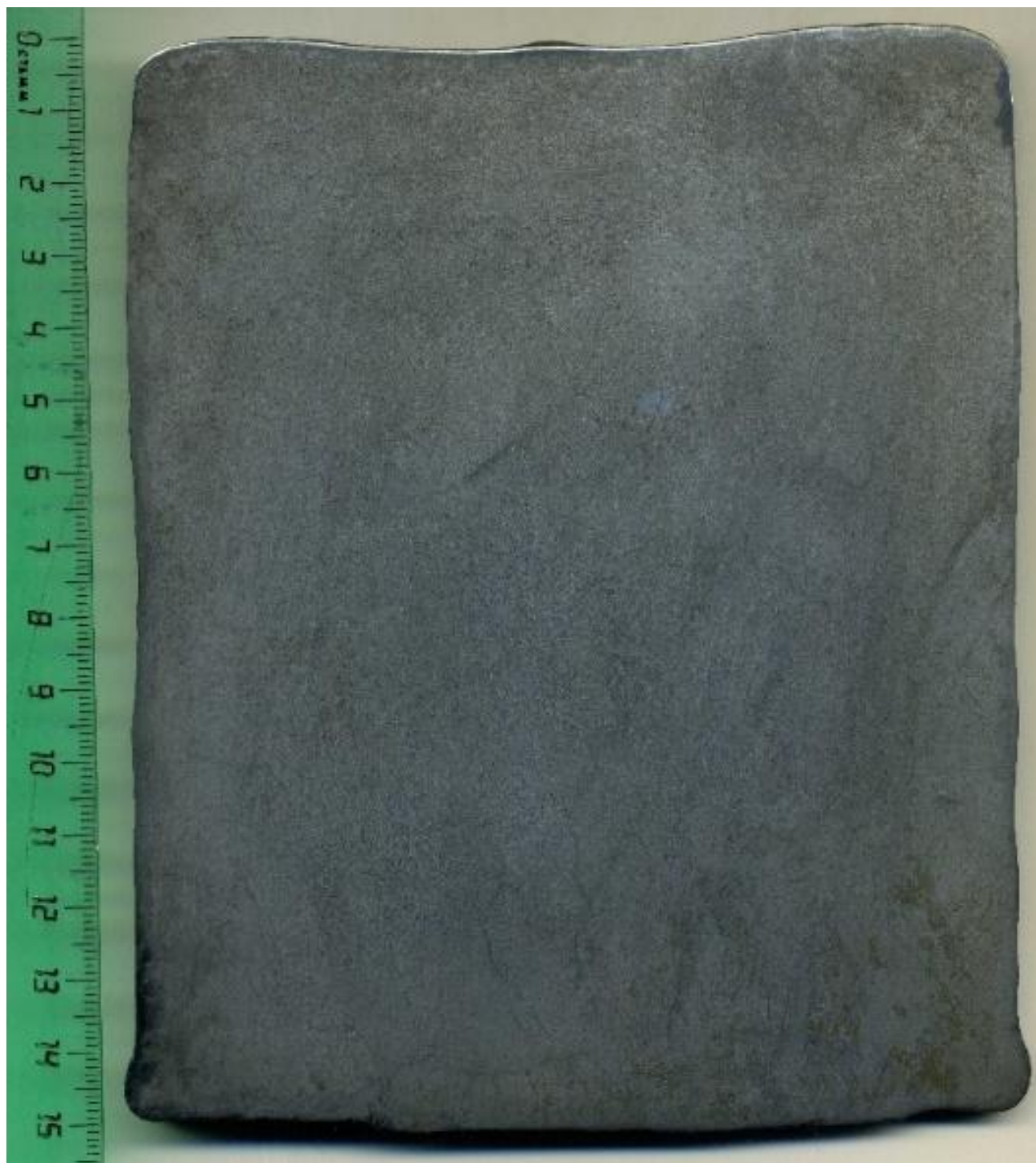
Постоянный ток обратной полярности,
вращение РЭ, центр слитка

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (1 из 6)

Переменный ток, стационарный РЭ

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (2 из 6)

Переменный ток, вращающийся РЭ

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (3 из 6)

Постоянный ток. прямая полярность, стационарный РЭ

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (4 из 6)

Постоянный ток, прямая полярность, вращающийся РЭ

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (5 из 6)

Постоянный ток, обратная полярность, стационарный РЭ

Фотоснимки протравленных макротемплетов слитков ЭШП (5 из 6)

Постоянный ток, обратная полярность, вращающийся РЭ



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

28 № 01.10.2026
На № _____

СПРАВКА

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы Алексеева И.А.
в учебный процесс

Основные научно-технические результаты, представленные в диссертационной работе Алексеева Ивана Андреевича на тему «Влияние постоянного тока при ЭШП вращающегося расходомерного электрода на процессы плавления, кристаллизации и рафинирования стали» по специальности 2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких 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



А.Н. Дильдин

О.В. Маршалов