

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



**Думова Любовь Валерьевна**

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ  
ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ  
РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА**

Специальность

2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Протопопов Евгений Валентинович

Новокузнецк

2024 г.

## Оглавление

Введение.....	4
1 Современное состояние теории и технологии производства рельсовой стали.....	13
1.1 Характеристика химического состава и показателей качества рельсовых сталей.....	13
1.2 Анализ перспективных технологических решений по повышению качества рельсовой стали.....	18
1.3 Выводы и постановка задач исследования.....	33
2 Исследования процессов формирования металлургического качества рельсов на различных этапах производства рельсовой стали.....	35
2.1 Методика исследований.....	35
2.2 Исследования качества структуры непрерывнолитых заготовок и дефектов рельсов металлургического происхождения.....	39
2.3 Исследования влияния параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали на образование внутренних дефектов рельсов.....	46
2.4 Выводы по главе 2.....	57
3 Моделирование процессов внепечной обработки рельсовой стали на агрегате «ковш-печь» с целью обоснования эффективных режимов рафинирования расплава.....	58
3.1 Исследование эффективности перемешивания металла в сталеразливочном ковше при различных режимах продувки инертным газом..	59
3.2 Численные исследования параметров теплообмена при инжекционной подаче порошков в расплав рельсовой стали на агрегате «ковш-печь».....	68
3.3 Выводы по главе 3.....	85
4 Разработка и совершенствование технологических режимов выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения металлургического качества рельсов и технико-экономических показателей производства стали.....	86
4.1 Методика и условия проведения промышленных исследований.....	86
4.2 Исследование и оптимизация режимов продувки расплава инертным газом на агрегате «ковш-печь».....	88
4.3 Совершенствование режимов раскисления рельсовой стали на выпуске из дуговой электропечи.....	95

4.4 Оптимизация состава металлозавалки электроплавки рельсовой стали с целью повышения технико-экономических показателей ее производства.....	99
4.5 Выводы по главе 4.....	106
Заключение.....	108
Библиографический список.....	111
Приложение А.....	129
Приложение Б.....	130

## **Введение**

### **Актуальность работы.**

Железнодорожные рельсы в настоящее время являются одним из наиболее высокотехнологичных видов металлопродукции с широким перечнем регламентированных свойств и параметров качества. Для железнодорожных рельсов требования к показателям их металлургического качества, традиционно контролируемых в изделиях из сталей ответственного назначения, являются более жесткими по отношению к абсолютному большинству различных видов металлопродукции. При этом помимо традиционных требований к изделиям из качественных сталей применительно к рельсам регламентирован целый ряд дополнительных показателей, в том числе допустимое содержание газов, загрязненность глобулярными неметаллическими включениями, отсутствие внутренних дефектов, выявляемых при сплошном ультразвуковом контроле.

Наличие вышеприведенных требований к рельсам обуславливает значимость научно-технического направления, связанного с повышением качества рельсовых сталей. Развитие указанного направления проявляется во внедрении современных технических и технологических решений в сталеплавильных цехах металлургических предприятий, производящих рельсовую продукцию, в частности, в АО «ЕВРАЗ ЗСМК», являющемся в настоящее время ведущим отечественным производителем железнодорожных рельсов. Следует отметить, что, не смотря на достигнутое в последние годы значительное повышение показателей металлургического качества отечественных железнодорожных рельсов, по-прежнему имеет место высокий уровень отбраковки рельсов по внутренним дефектам, составляющий в различные временные периоды от 2% до 5% от общего объема производства рельсов. Раскрытие закономерностей формирования таких дефектов рельсов является актуальной задачей, сложность решения которой обусловлена наличием совокупного влияния множества взаимосвязанных параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали на вероятность их образования.

Необходимо констатировать, что поскольку повышение качества рельсовых сталей неразрывно связано с совершенствованием технологических режимов их выплавки и внепечной обработки, то актуальным научно-техническим направлением является разработка математических моделей, позволяющих достоверно прогнозировать изменения технико-экономических показателей производства рельсовой стали при варьировании основных технологических параметров.

На основании вышесказанного, а также с учетом того факта, что порядка 70% рельсовых сталей в России на сегодняшний день выплавляется в дуговых электропечах, можно сделать вывод, что выбранное направление исследований по развитию технологических основ выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали является в настоящее время актуальным и перспективным направлением.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Тематика, связанная с повышением качества рельсовых сталей и металлургического качества рельсов, являлась предметом множества научных исследований, проведенных под руководством профессоров Ю.В. Грдины, Е.Я. Зарвина, А.А. Дерябина, Л.А. Смирнова, Е.А. Шура, К.В. Григоровича, С.С. Черняка и др. Указанные исследования послужили научной базой для определения основных направлений совершенствования технологии производства рельсовых сталей, позволили добиться многократного снижения концентрации вредных примесей в рельсовых сталях, что в конечном итоге обеспечило значительное повышение показателей качества и эксплуатационных характеристик железнодорожных рельсов. В то же время необходимо отметить, что значительная доля указанных исследований проводилась применительно к рельсовой стали, выплавленной в мартеновских печах, не подвергавшейся внепечной обработке и разлитой в изложницы. В результате использование полученных данных и закономерностей для условий современного сталеплавильного производства является некорректным. Кроме вышеуказанной причины на ограниченность области применения ранее проведенных

исследований формирования качества рельсовых сталей оказывают влияние такие существенные факторы, как переход на новые марки стали для массового производства рельсов, изменение технологии раскисления рельсовой стали.

Также необходимо отметить, что исследователями, специализирующимися на совершенствовании технологии выплавки и внепечной обработки рельсовых сталей, практически не разрабатывалась тематика, связанная с повышением технико-экономических показателей ее производства во взаимосвязи с основными регламентированными показателями качества рельсовых сталей.

**Работа выполнена** в рамках гранта РФФИ № 20-48-420011 «Теоретические основы энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами», 2020-2022 гг.

**Цель:** Научное обоснование и разработка технологических решений по повышению качества рельсовых сталей и оптимизации технико-экономических показателей ее производства.

Для достижения цели работы поставлены следующие **задачи**:

1) установить механизм формирования дефектов рельсов металлургического происхождения, являющихся причинами их несоответствия требуемым параметрам качества, в том числе определить характер и степень влияния технологических параметров производства рельсовой электростали на образование таких дефектов;

2) разработать статистическую модель прогнозирования отбраковки рельсов по дефектам металлургического происхождения при варьировании технологических параметров производства рельсовой стали;

3) выполнить исследования эффективности перемешивания расплава рельсовой стали при продувке в сталеразливочном ковше инертным газом;

4) с использованием численного моделирования получить новую информацию по характеристикам газопорошкового течения потоков в погружной фурме и рациональным параметрам продувки при подаче порошкообразных материалов в расплав рельсовой стали в процессе обработки на агрегате «ковш-печь»;

5) разработать технологические решения по повышению качества рельсовых сталей, снижению отбраковки рельсов по внутренним дефектам металлургического происхождения;

6) разработать математическую модель прогнозирования технико-экономических показателей электроплавки рельсовой стали при различном соотношении составляющих металлозавалки.

### **Научная новизна:**

1. Определены и научно обоснованы закономерности формирования характерных внутренних дефектов рельсов металлургического происхождения при их производстве из электростали, в том числе определена природа таких дефектов, установлено определяющее влияние на вероятность их образования параметров продувки расплава инертным газом в процессе ковшевой обработки, минимизации содержания в стали таких элементов, как кислород, сера, фосфор, медь и олово.

2. Установлены закономерности влияния интенсивности продувки рельсовой стали инертным газом в сталеразливочном ковше на показатели перемешивания расплава в зависимости от режимов истечения газовых струй и характеристик переноса.

3. Применительно к процессу подачи порошкообразных реагентов в расплав рельсовой стали через погружную фурму при обработке на агрегате «ковш-печь» определены закономерности теплообмена через стенку фурмы к двухфазной газопорошковой струе и количественные взаимосвязи характеристик газопорошкового течения.

### **Практическая значимость работы:**

1. Получены аналитические зависимости влияния технологических параметров выплавки в дуговой электропечи и внепечной обработки рельсовой стали на образование внутренних дефектов рельсов металлургического происхождения, что создает возможность их практического применения при совершенствовании технологии.

2. Разработаны, прошли опытно-промышленное опробование и внедрены в

условиях электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (подтверждено Актом внедрения).

- оптимизированный режим продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь», отличительной особенностью которого является наличие выделенного периода с повышенной интенсивностью подачи газа; внедрение рекомендованного режима в производство позволило снизить отбраковку рельсов по внутренним дефектам металлургического происхождения на 0,5% (ожидаемый экономический эффект составляет 15 млн. руб/год при долевом участии автора – 25%);

- режим раскисления рельсовой стали ферросплавами с пониженным содержанием алюминия, обеспечивший снижение отбраковки рельсов из-за наличия глиноземистых неметаллических включений на 0,4% при одновременном увеличении степени сквозного усвоения кремния и углерода и уменьшении затрат на раскисление (ожидаемая экономическая эффективность от внедрения составляет 23 млн. руб/год при долевом участии автора – 20%);

- модель прогнозирования технико-экономических показателей производства рельсовой электростали при варьировании состава металлозавалки в условиях изменяющегося уровня цен на материалы и энергоносители, использование которой позволяет минимизировать затраты на производство рельсовой стали при заданном уровне производительности электросталеплавильного цеха.

3. Получены новые данные о количественной взаимосвязи параметров газопорошковой продувки рельсовой стали в ковше через погружную фурму с показателями, определяющими технологичность и эффективность процесса, что является теоретической базой для разработки оптимальных режимов вдувания порошковых реагентов в процессе обработки расплава на агрегате «ковш-печь» с целью глубокой десульфурации рельсовой стали.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке магистров по направлению 22.04.02 Металлургия.

## **Методология и методы исследования.**

Исследования процессов формирования металлургического качества рельсов проведены с использованием методов оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового и рентгеноспектрального анализа образцов рельсовой стали промышленного производства, применением статистического анализа влияния параметров производства рельсовой стали на отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения в программном комплексе MATLAB. При численном моделировании продувки расплава инертным газом и вдувания порошковых материалов в процессе ковшевой обработки стали использовали фундаментальные положения термодинамики, кинетики и гидродинамики расплава. Экспериментальные исследования по определению эффективности разработанных режимов ковшевой обработки рельсовой стали проводили в условиях действующего электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности формирования металлургического качества рельсов на стадиях выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали, включая определение природы характерных дефектов рельсов и количественного влияния технологических параметров производства рельсовой стали на вероятность формирования указанных дефектов.
2. Результаты модельных исследований и оценки показателей перемешивания расплава рельсовой стали в процессе продувки инертным газом на агрегате «ковш-печь».
3. Результаты численного моделирования процессов влияния теплообмена через стенку погружной фурмы на параметры транспортирующего газа при газопорошковой продувке рельсовой стали в сталеразливочном ковше.
4. Усовершенствованный режим продувки расплава рельсовой стали инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь», обеспечивающий повышение металлургического качества рельсов.
5. Результаты опробования технологии раскисления рельсовой стали в

ковше ферросплавами с пониженным содержанием алюминия, обеспечивающей снижение содержания глиноземистых включений в готовых рельсах при одновременном повышении степени сквозного усвоения кремния и углерода и снижении производственных затрат.

6. Закономерности влияния параметров металлозавалки электроплавки рельсовой стали на технико-экономические показатели производства.

7. Статистическая модель прогнозирования технико-экономических показателей выплавки рельсовой стали в дуговых электропечах при варьировании состава металлошихты, учитывающая изменение цен на материалы и энергоносители.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности

2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов по следующим пунктам:

- п. 18 «Электро- и спецэлектрометаллургические процессы и агрегаты»;
- п. 21 «Внепечная обработка металлов»;
- п. 23 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов»;
- п. 26 «Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирования техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами».

**Личный вклад** автора заключается в разработке плана исследований, проведении статистического анализа процессов формирования показателей качества непрерывнолитых заготовок рельсовой стали и металлургического качества рельсов, проведении моделирования процессов ковшевой обработки рельсовой стали, проведении экспериментальных исследований в условиях промышленного производства, обработке и анализе полученных экспериментальных данных, формулировании выводов.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается совместным использованием различных методов теоретических, лабораторных и экспериментальных исследований при их значительном объеме; применением современного лабораторного аналитического оборудования, оснащенного системами автоматической обработки и визуализации данных, программных комплексов для статистического анализа данных; качественным совпадением и сопоставимостью полученных результатов с данными других исследователей по тематике работы; подтвержденной эффективностью внедрения технологических решений, разработанных на основании результатов исследований, в электросталеплавильном цехе металлургического производства.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийские научные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2016, 2017, 2022 гг.), II Международная научно-практическая конференция «Роль технических наук в развитии общества (г. Кемерово, 2017 г.), XX Международная научно-техническая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2017 г.), XV Международный конгресс сталеплавателей (г. Тула, 2018 г.), VII Международная научно-практическая конференция «Теория и практика современной науки» (г. Пенза, 2022 г.), XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Результаты современных научных исследований и разработок» (г. Пенза, 2022 г.), 2-ая Конференция с международным участием «Качество стали 2024: от руды до проката» (г. Москва, 2024 г.).

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 4 статьи, индексируемые в международной базе данных SCOPUS, 17 статей в журналах и сборниках трудов.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и

изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 30 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 154 наименований.

# **1 Современное состояние теории и технологии производства рельсовой стали**

## **1.1 Характеристика химического состава и показателей качества рельсовых сталей**

В отечественной металлургии массовое производство рельсовых сталей начинается с 30-х годов XX века [1]. В первом стандарте на производство рельсов (ОСТ 4118-32) марки рельсовых сталей не присутствовали и различие химического состава зависело от способа выплавки стали (мартеновский или бессемеровский) и сорта рельсов (I, II сорт). Впервые марки рельсовых сталей появились в ГОСТ 4224-48, в котором представлено по одной марке стали для каждого способа производства, при этом значимых отличий от требований предыдущего стандарта в химическом составе рельсовых сталей не наблюдалось.

Следует отметить, что нормированию в вышеприведенных стандартах подвергалось только содержание основных элементов (C, Mn, Si) и вредных примесей (S, P). При этом рельсовая сталь, выплавленная в бессемеровских конвертерах, отличалась от мартеновской стали пониженным содержанием углерода и повышенным допустимым содержанием вредных примесей.

В ГОСТ 24182-80 [2] уже представлено восемь марок рельсовых сталей (таблица 1.1), в которых общими отличительными особенностями химического состава от первых отечественных рельсовых сталей явилось повышенное содержание углерода, дополнительное легирование расплава такими элементами, как ванадий, титан и цирконий, а также снижение допустимой концентрации вредных примесей.

Следует отметить, что в данном стандарте все стали являются мартеновскими, однако для трех марок стали уже была предусмотрена возможность их производства из конвертерной стали с маркировкой в этом случае буквой «К» [1].

В государственном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 51685-2000 [3] в отличие от ГОСТ 24182-80 представлено уже три способа выплавки рельсовых сталей (мартеновский, конвертерный и электродуговой).

Анализируя химический состав рельсовых сталей в ГОСТ Р 51685-2000 можно выделить следующие их основные отличительные особенности от сталей по ГОСТ 24182-80 (таблица 1.1):

- появление марок стали с повышенным до заэвтектоидных значений содержанием углерода;
- появление марок сталей, легированных хромом;
- повышение количества марок сталей, легированных ванадием и увеличение верхней допустимой концентрации ванадия в сталях (с 0,07% до 0,15%);
- появление требований по допустимым концентрациям примесей цветных металлов (медь, никель, хром, алюминий);
- снижение допустимых концентраций серы и фосфора;
- отказ от производства сталей, легированных цирконием.

Анализируя ГОСТ Р 51685-2013 [4] необходимо отметить тенденцию по повышению содержанию углерода в рельсовых сталях – максимально допустимое содержание углерода повышено до 0,95% (с 0,90% в ГОСТ Р 51685-2000). Кроме того по сравнению с ГОСТ Р 51685-2000 имеет место (таблица 1.1):

- расширение перечня сталей, легированных хромом, при одновременном повышении верхнего предела содержания данного элемента (с 0,60% до 0,80-1,25%);
- появление сталей, легированных азотом;
- отказ от производства сталей, легированных титаном;
- ужесточение требований по допустимому содержанию серы, фосфора и алюминия для всех марок стали;
- снижение суммарной допустимой концентрации примесей цветных металлов и появление новых требований, связанных с содержанием цветных металлов для всех марок стали.

Таблица 1.1 – Анализ изменения химического состава рельсовых сталей

Марка стали	Содержание химических элементов, %												
	C	Mn	Si	V	Cr	N	Zr	Ti	S	P	Al	Cu	Ni
									не более				
ГОСТ 24182-80													
M76B	0,71-0,82	0,75-1,05	0,25-0,45	0,03-0,07	-	-	-	-	0,045	0,035	-	-	-
M76T	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	-	0,007-0,025	0,045	0,035	-	-	-
M76BT	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	0,01-0,02	-	-	-	0,005-0,025	0,045	0,035	-	-	-
M76Ц	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	0,001-0,050	-	0,045	0,035	-	-	-
M74T	0,69-0,80	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	-	0,007-0,025	0,045	0,035	-	-	-
M74Ц	0,69-0,80	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	0,001-0,050	-	0,045	0,035	-	-	-
M76	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	-	-	0,045	0,035	-	-	-
M74	0,69-0,80	0,75-1,05	0,18-0,40	-	-	-	-	-	0,045	0,035	-	-	-
ГОСТ Р 51685-2000													
K78XCФ Э78XCФ	0,74-0,82	0,75-1,15	0,40-0,80	0,05-0,15	0,40-0,60	-	-	-	0,025	0,025	0,005	0,35	0,35
M76Ф	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	0,03-0,15	н.б. 0,20	-	-	-	0,035	0,040	0,020	0,20	0,20
K76Ф Э76Ф	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	0,03-0,15	н.б. 0,20	-	-	-	0,025	0,025	0,020	0,20	0,20
M76T	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	-	н.б. 0,20	-	-	0,007-0,025	0,035	0,040	0,020	0,20	0,20
K76T Э76T	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	-	н.б. 0,20	-	-	0,007-0,025	0,025	0,025	0,020	0,20	0,20
M76	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	-	н.б. 0,20	-	-	-	0,035	0,040	0,020	0,20	0,20
K76 Э76	0,71-0,82	0,75-1,15	0,25-0,60	-	н.б. 0,20	-	-	-	0,025	0,025	0,020	0,20	0,20
K86Ф Э86Ф	0,83-0,90	0,75-1,15	0,25-0,60	0,03-0,15	н.б. 0,30	-	-	-	0,025	0,025	0,020	0,35	0,35
ГОСТ Р 51685-2013													
90ХАФ	0,83-0,95	0,75-1,25	0,25-0,60	0,08-0,15	0,20-0,60	0,010-0,020	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,15
76ХАФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,03-0,15	0,20-0,80	0,010-0,020	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,20
76ХФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,03-0,15	0,20-0,80	-	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,15 (0,20)
76ХСФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,05-0,15	0,50-1,25	-	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,15
90АФ	0,83-0,95	0,75-1,25	0,25-0,60	0,08-0,15	н.б. 0,20	0,010-0,020	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,15
76АФ	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,05-0,15	н.б. 0,20	0,010-0,020	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,20
76Ф	0,71-0,82	0,75-1,25	0,25-0,60	0,03-0,15	н.б. 0,20	-	-	н.б. 0,010	0,020	0,020	0,004	0,20	0,15 (0,20)

Следует отметить общую тенденцию к переходу с массового производства рельсов из сталей, легированных ванадием (К76Ф, Э76Ф), на производство рельсов общего назначения из сталей, дополнительно легированных хромом (Э76ХФ) и производство рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости для установки на участках пути с наиболее тяжелыми условиями эксплуатации из заэвтектоидной стали, дополнительно легированной хромом и азотом (Э90ХАФ).

В последней (действующей) редакции основного нормативного отечественного документа на производство рельсов ГОСТ Р 51685-2022 изменен подход к регламентации химического состава рельсовых сталей [5]. Фактически в явном виде выделены три базовые марки стали, отличающиеся содержанием углерода при практически идентичном содержании кремния и марганца. Для каждой из базовых марок рельсовой стали предусмотрена возможность легирования хромом до содержания 0,20-0,60%, азотом до содержания 0,010-0,020% и ванадием до содержания 0,03-0,15%. При этом важной особенностью нового ГОСТ является тот факт, что допускается ввод в сталь дополнительных легирующих элементов и изменение интервалов содержания химических элементов при условии соблюдения требования по механическим свойствам и твердости рельсов. Анализируя отличительные особенности ГОСТ Р 51685-2022 необходимо отметить повышение допустимого содержания углерода в рельсовых сталях до 1,05%, что фактически является продолжением тенденции, отмеченной для предыдущих версий указанного стандарта на производства рельсов. Требования к содержанию вредных примесей и примесей цветных металлов практически остались без изменений.

В соответствии с требованиями действующей нормативной документации (ГОСТ Р 51685-2022) к основным параметрам качества рельсовых сталей следует относить:

- содержание вредных примесей (S, P) и примесей цветных металлов (Cu, Ni, Cr, Ti, Al);
- содержание газов (водород, кислород) – содержание кислорода

контролируется в рельсах;

- загрязненность неметаллическими включениями (наибольшие и средние размеры включений, коэффициент загрязненности неметаллическими включениями) – контролируется в рельсах.

Таким образом, на протяжении истории массового производства рельсов имело место ужесточение требований к содержанию вредных примесей и примесей цветных металлов в рельсовых сталях. Так, например [3, 4], сравнительный анализ требований ГОСТ Р 51685-2000 и ГОСТ Р 51685-2013 показывает следующие изменения указанных требований (таблица 1.1): предельно допустимая концентрация серы снижена в 1,25-2,0 раза, фосфора – в 1,25-1,75 раза, алюминия – в 1,25-6,25 раза, меди – до 1,75 раза, никеля – до 2,3 раза, хрома – до 1,5 раз; суммарная концентрация примесей цветных металлов – в 1,25 раза (с 0,50% до 0,40%). При этом введены новые требования, касающиеся допустимой концентрации титана (не более 0,010%) и допустимой суммарной концентрации меди и никеля (не более 0,27%).

Значительному ужесточению также подверглись требования к содержанию кислорода в рельсах. Так если в ГОСТ Р 51685-2000 допустимое содержание кислорода в рельсах массового назначения (рельсы категорий Т1, Т2, Н) составляло 0040%, и, кроме того, являлось факультативной нормой, то в последующих версиях данного стандарта (ГОСТ Р 51685-2013 и ГОСТ Р 51685-2022) для рельсов массового назначения допустимое содержание кислорода снижено до 0,020%, то есть в 2 раза. Для рельсов специального назначения предельное содержание кислорода снижено в ГОСТ Р 51685-2022 относительно ГОСТ Р 51685-2013 в 1,5 раза (с 0,020% до 0,015%).

Требования к загрязненности неметаллическими включениями также были ужесточены [3, 4]. Так, если согласно ГОСТ Р 51685-2000 максимально допустимая длина строчек хрупкоразрушенных сложных окислов не должна была превышать 0,5 мм для рельсов высшего качества (категория В) и 2,0-8,0 мм для остальных категорий рельсов, то в соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 и ГОСТ Р 51685-2022 максимальная длина строчечных включений не должна превышать

353 мкм (0,353 мм) для рельсов специального назначения и 705 мкм (0,705 мм) для рельсов общего назначения при их допустимой средней длине 300 мкм и 500 соответственно. Также в ГОСТ Р 51685-2013 введены дополнительные требования по допустимому максимальному диаметру отдельных глобулярных включений, а в ГОСТ Р 51685-2022 – требование по допустимой длине строчечных глобулярных включений. При этом введенные в ГОСТ Р 51685-2013 требования по коэффициенту загрязненности рельсов отдельными глобулярными и строчечными включениями (не более  $30 \text{ мкм}^2/\text{мм}^2$ ) ужесточены в ГОСТ Р 51685-2022 для рельсов специального назначения применительно к категории ВС (рельсы для высокоскоростного движения).

Необходимо констатировать, что соблюдение вышеуказанных требований ГОСТ к качеству рельсовой стали (даже с учетом тенденции к значительному повышению таких требований) не гарантирует отсутствие недопустимых дефектов сталеплавильного происхождения в рельсах при их массовом производстве. Это подтверждается, как значительной отбраковкой рельсов по результатам сквозного ультразвукового контроля их качества в потоке рельсобалочных станов (отбраковка находится на уровне 2-5% от общего объема производства), так и высокой частотой аварийного и преждевременного выхода из строя рельсов, установленных в пути, из-за наличия металлургических дефектов (ежегодно из действующих железнодорожных сетей изымается порядка 50 тыс. таких рельсов) [6].

Отмеченные особенности свидетельствуют о том, что разработка технологических решений по снижению концентрации неметаллических включений, вредных примесей и примесей цветных металлов в рельсовых сталях является актуальным научно-техническим направлением.

## **1.2 Анализ перспективных технологических решений по повышению качества рельсовой стали**

Основные положения стратегии развития металлургической отрасли России

до 2030 года [7] предусматривают разработку и освоение производства рельсов, обеспечивающих наработку пропущенного тоннажа 2,5 млрд. тонн брутто, что невозможно без кардинального совершенствования структуры производства рельсовой стали, использования современных технологических разработок выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали. Поэтому для решения поставленных задач необходимо последовательное обеспечение производителями рельсового проката высокого качества металлопродукции на всех этапах независимо от способа производства.

В соответствии с [8] наибольшая доля рельсовых сталей в мире выплавляется в кислородных конвертерах. В частности, такой способ производства применяется для получения рельсовых марок стали в США, Японии, Австрии, Франции, Италии. Выплавка рельсовых сталей в дуговых электропечах получила меньшее распространение. В большинстве случаев опубликованная информация о производстве рельсовых сталей в зарубежных странах имеет общий и рекламный характер.

В России выплавка рельсовых сталей в настоящее время производится на трех металлургических комбинатах: АО «ЕВРАЗ ЗСМК» – в дуговых электропечах, АО «ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «Мечел» – в кислородных конвертерах [9]. При этом наибольшую долю в общей структуре производства рельсовых сталей (более 70%) занимает АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В таблице 1.2 представлена характеристика технологических особенностей производства рельсов в различных странах мира [9].

Освоению технологии выплавки рельсовых сталей в кислородных конвертерах предшествовали комплексные исследования [10-13], показавшие принципиальную возможность получения стали с пониженным содержанием газов и неметаллических включений по сравнению с мартеновской сталью, хотя при этом имели место значительные и объективные технологические трудности. К основным задачам, которые решались при разработке технологии выплавки рельсовых сталей в кислородных конвертерах необходимо отнести возможность получения качественной стали при остановке продувки на заданном высоком

содержании углерода в металле, соответствующем химическому составу готовой стали и обеспечение высокой температуры металла на выпуске для последующей разливки на МНЛЗ.

Таблица 1.2 – Технологические варианты производства рельсов

Страна-изготовитель рельсов, предприятие	Выплавка стали	Термическая обработка
Россия, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	Электропечь	Дифференцированная закалка
Россия, АО «ЕВРАЗ НТМК»		Объемная закалка с отдельного печного нагрева
Россия, ПАО «ЧМК»		Дифференцированная закалка
Франция		Двухсторонняя закалка сжатым воздухом с отдельного объемного нагрева ТВЧ
Япония		Двухсторонняя закалка сжатым воздухом с прокатного нагрева
США		Двухсторонняя закалка водой с прокатного нагрева
Австрия		Односторонняя закалка в растворе полимера с прокатного нагрева
Италия		Без термического упрочнения
Польша		Без термического упрочнения

Следует отметить, что большинство из перспективных технологических приёмов обеспечения качества рельсов уже прошли стадию промышленных исследований, а в ряде случаев и стадию внедрения на различных металлургических предприятиях. В то же время однозначных рекомендаций по эффективности использования того или иного способа производства также нет, что предопределяет необходимость проведения дополнительных исследований на различных этапах производства. Так [14], использование жидкого чугуна в металлошихте при выплавке рельсовой электростали накладывает определённые ограничения на технологию и предопределяет необходимость учёта целого ряда технических факторов. Прежде всего, необходимо учитывать, что в связи с развитием и внедрением непрерывной разливки стали доля оборотного лома будет постоянно снижаться, при этом важной особенностью существующих вариантов технологии сталеплавильной плавки является устойчивая тенденция изменения расходных коэффициентов в сторону увеличения доли чугуна в

металлошихте и, соответственно, уменьшения доли лома, что предопределяет необходимость создания новых подходов. При этом незначительное распространение производства рельсовых сталей в дуговых электропечах в мире обусловлено, в основном, жесткими требованиями к допустимому содержанию примесей цветных металлов (медь, никель, хром) в готовой стали [4, 5]. Для традиционной технологии электроплавки характерным является использование в качестве металлошихты только металлического лома, который отличается от чугуна возможным повышенным содержанием примесей цветных металлов. Причем в последние десятилетия проблема загрязненности металлолома примесями цветных металлов усугубляется в связи с внедрением непрерывной разливки стали. Поскольку примеси цветных металлов практически не удаляются в процессе плавки стали, то увеличение их содержания в металлоломе приводит к пропорциональному увеличению их содержания в готовой стали, что наглядно проиллюстрировано, например, авторами работы [15] применительно к производству трубных сталей.

Для организации производства рельсовых сталей в дуговых электропечах, соответствующих требованиям стандартов по содержанию примесей цветных металлов, необходимо либо использование качественного металлолома с применением его дополнительной сортировки и подготовки, либо замещение части металлолома другими видами металлошихты, в частности чугуном или альтернативными материалами (например, железом прямого восстановления) [16, 17].

Другой проблемой современного сталеплавильного производства, в связи с изменениями возможностей рудной базы и качества исходной шихты, являются значительные колебания содержания марганца, кремния и фосфора в чугуне, что приводит к образованию различного количества шлака в агрегате, сворачиванию шлака, выносу и заметалливанию технологического оборудования и дополнительным потерям металла [18]. Указанные обстоятельства вынуждают промежуточно скачивать шлак, что увеличивает цикл плавки, расход металлошихты, снижает стойкость футеровки и требует разработки новых

рациональных приёмов управления состоянием ванны.

В настоящее время на большинстве металлургических предприятий отрасли осуществляется техническое перевооружение путём внедрения современного оборудования и комплексных ресурсо- и энергосберегающих технологий производства высококачественной стали в производственном маршруте «доменная печь – электропечь (кислородный конвертер), который является доминирующим в мировой металлургии. В производственной практике наиболее оптимальным вариантом такого технологического маршрута является [19]:

- выплавка в доменных печах с использованием пылеугольного топлива перedельного чугуна с пониженным содержанием кремния ( $\text{Si} \leq 0,2 - 0,3\%$ ), марганца ( $\text{Mn} \leq 0,3 - 0,4\%$ ), фосфора ( $0,05 - 0,2\%$ ), а также максимально низким нерегламентированным содержанием серы ( $\text{S} \leq 0,03\%$ );

- внедоменное рафинирование чугуна перед сталеплавильной плавкой с максимальным удалением кремния, серы и фосфора до концентрации ниже 0,1, 0,005% и 0,015% соответственно с применением современных инъекционных технологий и оборудования для последовательной обработки чугуна на желобе доменной печи в чугуновозном ковше миксерного типа и в заливочном ковше;

- комплексной доводки металлического полупродукта в сталеразливочном ковше и на установках «ковш-печь», в том числе с применением порошкообразных материалов для стабилизации химического состава и температуры перед непрерывной разливкой.

Современной зарубежной практикой, прежде всего на металлургических предприятиях Китая, Японии, Германии и Южной Кореи, доказано, что осуществление процессов обескремнивания, десульфурации и дефосфорации чугуна за пределами доменной печи технологически и экономически выгодно с точки зрения повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности производства в целом [20].

В результате внедрения такой комплексной технологии предварительной обработки чугуна, получила распространение так называемая малошлаковая

технология выплавки стали [21-29]. При этом необходимо учитывать, что исключение из приходной части теплового баланса химического тепла, вносимого реакциями окисления кремния и фосфора, вынуждает уменьшать долю лома в металлозавалке. Такой отрицательный эффект в значительной мере можно компенсировать дополнительным приходом тепла в плавку от использования газообразного или твёрдого топлива, применения специальных фурм и горелок для дожигания отходящих газов в рабочем пространстве сталеплавильного агрегата, а также сокращением потерь тепла шлаком из-за уменьшения расхода извести (до 20-30 кг/т стали) и общего количества шлака.

Согласно исследований [27, 28] качество рельсов при их производстве из конвертерной стали, выплавленной из низкомарганцовистого чугуна, а именно пластичность и циклическая прочность рельсов, находится на уровне, не уступающем качеству рельсов из мартеновской стали. При этом приводятся данные [29] о пониженной загрязнённости рельсовой стали неметаллическими включениями по сравнению с мартеновской сталью. При выплавке рельсовой стали в условиях АО «ЕВРАЗ НТМК» доказана принципиальная возможность применения специфической технологии, особенности которой связаны использованием природно-легированного ванадием чугуна [30]. В данном варианте рельсовая сталь выплавляется дуплекс-процессом без использования в шихте металлолома. В технической литературе широко представлены данные о положительном опыте использования технологии выплавки рельсовой стали в кислородных конвертерах с остановкой продувки на низком или среднем содержании углерода и последующим науглероживанием [31-33].

Согласно имеющимся данным впервые опытно промышленное опробование выплавки рельсовой электростали проведено на дуговых печах ёмкостью 60 т по технологии, разработанной для выплавки стали марки ШХ15 [34]. По данной технологии шихтовка плавки производится исходя из получения содержания углерода по окончании периода плавления на уровне 1,0-1,3 %. Во время окислительного периода плавки проводится присадка железной руды, извести и плавикового шпата, после чего проводится продувка ванны кислородом в течение

20-30 мин. По окончании окислительного периода проводится скачивание шлака, а доводка по содержанию углерода осуществляется путем присадки в печь графитового боя и ферромарганца. В дальнейшем для раскисления используется ферросилиций марки ФС75 и алюминий в количестве 0,8-1,3 кг/т. Реализация такой технологии приводит к повышенной загрязненности стали глиноземистыми включениями (до 70 % всех включений содержат  $Al_2O_3$ ). В результате при испытании опытных рельсов, прокатанных из такой электростали, на кольце ЦНИИ МПС не обеспечено повышение стойкости и надежности рельсов по сравнению с рельсами из мартеновской стали [34].

В процессе исследований [35, 36] опытные плавки рельсовой электростали проводились на Орско-Халиловском и Оскольском металлургических комбинатах. Причем в дальнейшем полученные слитки прокатывались в рельсы на Кузнецком металлургическом комбинате (в настоящее время АО «ЕВРАЗ ЗСМК»). Было выявлено повышение уровня механических свойств, а по результатам испытаний на экспериментальном кольце ЦНИИ МПС такие рельсы после пропуска 332,4 млн. т брутто находились в рабочем состоянии.

На Донецком металлургическом заводе выполнены исследования по выплавке рельсовой стали в дуговых электропечах емкостью 100 т [37]. При этом доля чугуна в металлошихте составляла 18-20%. Полученная сталь подвергалась вакуумной обработке, в процессе которой проводили присадку кремний- и марганецсодержащие ферросплавов и гранулированного алюминия. В рельсах, полученных из такой электростали, размер неметаллических включений не превышал 0,8 мм и при этом имело место увеличение предела прочности (временного сопротивления) на 40-50 Н/мм<sup>2</sup> относительно мартеновской стали.

В соответствии с [38] начало освоения технологии производства рельсовой стали в дуговых электропечах емкостью 100 т на Кузнецком металлургическом комбинате датируется 1995 г. Первоначально на опытных плавках в качестве металлошихты использовали металлолом и твердый чугун с последовательным увеличением его расхода с 5-15 т до 20-30 т на плавку с целью корректировки содержания углерода и снижения содержания примесей цветных металлов в

готовой стали. Первоначально согласно разработанной технологии внепечная обработка стали ограничивалась продувкой аргоном при разливке стали в изложницы. Несмотря на указанное несовершенство такой технологии производства рельсовой стали показатели ее качества превосходили рельсовую мартеновскую сталь, произведенную на комбинате. Отмечается [38] меньшая загрязненность рельсов сульфидными включениями и снижение средней длины строчки пластичных силикатов в 1,5-2,5 раза. Кроме того, полученная рельсовая электросталь обладала повышенными механическими свойствами, что, очевидно, было обусловлено нитридным упрочнением вследствие повышенного содержания азота в стали.

В дальнейшем на комбинате разработана и внедрена технология выплавки рельсовой электростали с использованием жидкого чугуна [39, 40]. Отмечаются значительные сложности при реализации данной технологии, связанные с организацией заливки жидкого чугуна в печь. В результате был реализован новый способ доставки чугуна к печи с перепланировкой грузопотоков в цехе [39, 40]. В данном варианте количество жидкого чугуна составляло 60-75 т, поэтому ковш разливали на две плавки, а в состав завалки и подвалки вводили 4-6 т извести, до 5 т руды и до 10 т агломерата. Для дополнительного окисления использовали верхнюю кислородную фурму при интенсивности продувки кислородом до 2600-3000 м<sup>3</sup>/ч, при этом для обеспечения дефосфорации стали в печь порционно вводили железную руду и известь. При этом после заливки чугуна осуществляли спуск шлака. В качестве положительных результатов такой технологии можно отметить снижение длительности плавки в среднем на 10 мин. и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 45-55 кВт·ч/т.

Полученные результаты позволили на площадке Кузнецкого металлургического комбината осуществить переход на выплавку рельсовых электросталей с использованием в металлошихте чугуна [41]. В то же время в настоящее время технология производства рельсовых электросталей претерпела существенные изменения по отношению к периоду ее освоения. В частности внедрена внепечная обработка стали на агрегатах комплексной обработки стали

(АКОС) и камерном вакууматоре, разливка 100% рельсовой стали производится непрерывным способом.

В целом анализ литературных данных [41-44] показывает, что технико-экономическая эффективность замещения части металлолома чугуном в шихте электроплавки не всегда очевидна. В частности, приводятся такие недостатки технологии выплавки электростали с применением чугуна, как:

- повышение количества шлака из-за высокого содержания кремния в чугуне, что, в свою очередь обуславливает повышение затрат на утилизацию шлака, повышение угара ферросплавов;
- увеличение расхода извести для получения требуемой основности шлака, а также увеличение тепловых потерь со шлаком;
- увеличение расхода марганецсодержащих ферросплавов вследствие меньшего содержания марганца в чугуне по сравнению с металлоломом;
- увеличение затрат на металлошихту из-за более высокой стоимости чугуна по сравнению с металлоломом;
- повышение расхода окислителей вследствие необходимости удаления из расплава вносимого чугуном углерода.

В то же время замещение части лома чугуном в металлозавалке позволяет добиться и ряда существенных преимуществ [41-44]:

- уменьшить расход топлива (природного газа);
- снизить расход науглероживателей (кокса);
- сократить затраты на подготовку металлолома к плавке;
- уменьшить концентрацию азота в стали, вследствие интенсификации окислительного периода и общего уменьшения продолжительности плавки;
- снизить расход огнеупорных изделий за счет уменьшения перепадов температур и отсутствия механических разрушений футеровки при загрузке тяжеловесной металлошихты;
- уменьшить загрязненность стали экзогенными неметаллическими включениями.

Обобщая приведенные данные можно констатировать, что оценку технико-

экономической эффективности использования чугуна в металлизавалке дуговых электропечей и выбор оптимального расхода чугуна следует проводить для условий конкретного агрегата и с учетом текущего уровня цен на материалы и энергоносители.

В целом следует отметить, что прошедшее изменение формы собственности предприятий, необходимость значительных инвестиций при реорганизации сталеплавильной отрасли, обуславливает значительное отставание по многим аспектам технологии и оборудования при производстве высококачественной стали. Поэтому на настоящем этапе указанное отставание необходимо ликвидировать ускоренными темпами с применением дополнительных исследований в направлениях совершенствования технологии внепечной обработки стали.

В соответствии с современными представлениями при производстве качественной рельсовой стали чрезвычайно важно обеспечить дальнейшее рафинирование расплава в сталеразливочном ковше на всех стадиях внепечной обработки при подготовке металла к разливке на МНЛЗ [41, 45, 46]. Особая значимость такой постановки задачи определена необходимостью получения откорректированного химического состава, определённой температуры и гомогенизации расплава, минимальной загрязнённости неметаллическими включениями и примесями цветных металлов.

Причём, по данным [47-50], содержание неметаллических включений и их химический состав в значительной степени определяется способом и технологическими особенностями производства рельсовой стали. Высокое металлургическое качество рельсов, как правило, связывают с отсутствием в них крупных хрупкоразрушенных оксидных неметаллических включений, что обеспечивается низким содержанием в стали алюминия (не более 0,004%) и кислорода общего (не более 20 ppm) [5]. При этом в соответствии с [51-57] особая роль всегда отводится способу и практике раскисления металла, а также технологическим особенностям внепечной обработки [58-60], в целом определяющей чистоту металла по оксидным неметаллическим включениям.

Несмотря на значительное количество отечественных [61-67] и зарубежных [68-71] исследований, по изучению влияния характерных неметаллических включений в рельсовой стали на механические и эксплуатационные свойства рельсов, следует констатировать отсутствие единого мнения по данному вопросу. Так авторы работы [63] утверждают, что глинозёмные неметаллические включения, нитриды и карбиды титана, а также хрупкоразрушенные сложные оксиды значительно увеличивают вероятность возникновения трещин в рельсах в процессе эксплуатации. В соответствии с [64] отмечается резко отрицательное влияние глобулярных неметаллических включений при формировании контактно-усталостных дефектов рельсов. Авторами [64] подчёркивается степень влияния таких включений на дефектообразование в рельсах практически на одном уровне со строчечными высокоглинозёмистыми включениями, считающимися одними из самых опасных и недопустимых видов включений в рельсах. В то же время в других работах [65] отмечается прямо противоположный факт, согласно которому глобулярные включения, к которым, например, относятся пластичные силикаты наоборот являются самым благоприятным типом неметаллических включений. При этом необходимо отметить, что согласно действующей нормативной документации [5] в рельсах регламентируются предельно допустимые размеры трёх видов неметаллических включений: глобулярные, строчечные глобулярные и строчечные остроугольные. Причём для первых двух типов включений также регламентируется и коэффициент загрязнённости металла неметаллическими включениями [5]. По данным [72, 73] помимо вида, размеров и концентрации неметаллических включений в рельсовой стали важным моментом является также расположение включений в непрерывнолитых заготовках и, соответственно, в готовых рельсах. При этом, например, в работе [72] зафиксировано, что в заготовках из рельсовой стали марки Э90ХАФ размеры и концентрация неметаллических включений увеличиваются от поверхности к центральной зоне, а по данным [73] подчёркивается наличие наибольшей загрязнённости неметаллическими включениями в местах, находящихся на стыках зон кристаллизации заготовок.

Известен целый ряд технологических решений по вводу в рельсовую сталь на выпуске из плавильного агрегата в ковш модификаторов различного состава с целью снижения ее загрязненности неметаллическими включениями [74-80].

Авторами работы [74] проведены исследования влияния модифицирования редкоземельными металлами (сплавом МЦ50ЖЗ, содержащим 66,78% Се и 32,9% La) в процессе внепечной обработки на АКП и вакууматоре на формирование неметаллических включений в рельсовой стали. Показано, что модифицирование РЗМ позволило уменьшить загрязненность рельсовой стали оксидными включениями, что положительно сказалось на ударной вязкости и пластических свойствах рельсов. Также отмечено повышение степени десульфурации (содержание серы на опытных плавках составило 0,003-0,005% против 0,007-0,010% на плавках текущего производства) и уменьшение концентрации кислорода в хрупкоразрушенных неметаллических включениях с 7-10 ppm до 3-5 ppm.

На Нижнетагильском металлургическом комбинате опробованы кальций- и цирконийсодержащие модификаторы (FeSiCa и SiZr) [75]. В ходе проведения исследований подачу модификаторов проводили в период наполнения ковша от 1/5 до 2/3 от его высоты, при этом вначале порциями вводили FeSiCa, а затем порционно SiZr. Анализ качества рельсов, полученных из модифицированной стали, показал отсутствие в таких рельсах неметаллических включений с длиной строчек 4 мм и более. Причем в сравнительной партии рельсов, произведенных из стандартной стали (без использования модификаторов) в структуре более чем 20% образцов выявлены неметаллические включения с длиной строчек от 4 до 16 мм. Имеются данные [76] о значительном снижении загрязненности неметаллическими включениями при использовании модификатора в виде силикокальция с цирконием и алюминием (6-7% Zr и 5-7% Al) – длина строчек неметаллических включений не превысила 2 мм. В работе [77] приводятся данные об эффективности применения модификаторов, имеющих в своем составе Mg и Ti (55-58% Si, 4-5% Mg, 4-7% Ti) без

алюминия. На полученных рельсах неметаллические включения с длиной строчек более 2 мм не обнаружены. В то же время использование лигатур аналогичного состава, но с вводом алюминия приводило к получению рельсов со средней длиной строчек неметаллических включений на уровне 5,3 мм. В исследовании [78] представлены данные о положительных результатах модифицирования рельсовой стали в ковше алюмобарием – общее содержание кислорода снижено с 0,0036-0,006% до 0,0026%, произошло снижение неравномерности пластических свойств. В работе [80] приводятся данные об успешном применении модификаторов, имеющих в своем составе помимо циркония и кальция ванадий – рельсы, полученные из модифицированных сталей, обладают повышенной износостойкостью и контактной выносливостью (до 23% и 7,2% соответственно) относительно рельсов из стандартной немодифицированной стали.

В целом необходимо отметить, что существенным недостатком технологических решений по модифицированию рельсовой стали является значительное увеличение себестоимости стали вне зависимости от вида применяемых модификаторов. Этим объясняется, что указанные технологические решения фактически доведены только до стадии опытно-промышленного опробования и не используются для массового производства рельсовых сталей.

В многочисленных исследованиях отмечается [81-85], что всё же наиболее простым и эффективным методом рафинирования металла от неметаллических включений является организация перемешивания расплава в сталеразливочном ковше за счёт продувки инертным газом. Опубликовано значительное количество работ [86-90], направленных на повышение эффективности удаления неметаллических включений из металла в шлак за счёт совершенствования режимов такой продувки. В частности согласно результатам [86] при использовании импульсной продувки металла инертным газом через днище ковша создаются более оптимальные условия для коагуляции и всплывания неметаллических включений относительно традиционного режима продувки. В

работах [87, 88] подтверждено положительное влияние импульсной продувки расплава в сталеразливочном ковше на снижение содержания неметаллических включений в расплаве и, кроме того, на улучшение технико-экономических показателей производства высококачественной стали. Обоснованию оптимальных режимов продувки инертными газами посвящены исследования [89, 90], проведённые с использованием методов математического и физического моделирования. В результате установлен целый ряд закономерностей поведения расплава в ковше, связанных с влиянием вида, агрегатного состояния и размеров неметаллических включений на условия и механизм их удаления из стального расплава [89], а также определены закономерности влияния количества и расположения пористых пробок в днище ковша, конструкции погружной фурмы и интенсивности продувки на эффективность перемешивания расплава [90].

В то же время многочисленные экспериментальные данные [81, 86-92] показывают, что результаты выполненных для конкретных условий работ имеют общий рекомендательный характер, не позволяющий получать стабильные показатели для различных условий производства. В работе [91] отмечается положительное влияние на гидродинамику расплава в ковше, эффективность его перемешивания и гомогенизации технологии с одновременной подачей инертного газа через погружную фурму и пористые пробки в днище. В целом подчёркивается многообразие различных методов газодинамической обработки металла в ковше, направленных на оптимизацию параметров технологии на комплексных установках типа «печь-ковш» (АКП) и различных вакууматорах. Авторами [92] отмечается, что скорость гомогенизации расплава и возникающих при продувке циркуляционных потоков всегда находится в зависимости от расхода инертного газа и места расположения продувочных узлов. В то же время авторы ряда работ, например [81], подчёркивают, что при увеличении интенсивности продувки возникают существенные проблемы, связанные с развитием вторичного окисления при раскрытии зеркала металла и повышенным износом футеровки сталеразливочного ковша.

По данным [93-96], эффективным методом глубокой десульфурации стали является вдувание порошкообразных реагентов в сталеразливочный ковш с металлом. Такой метод ковшевой обработки получил в последние годы достаточно широкое развитие для производства различных сталей ответственного назначения. Эффективность вдувания реагентов в виде порошков определяется обеспечением максимальной поверхности контакта и скорости взаимодействия реагентов с расплавом, а также дополнительным рафинирующим воздействием на металл газа-носителя. В совокупности такой метод обработки способствует, как более глубокой десульфурации и дефосфорации стали, так и значительному снижению расхода реагентов.

Так [93], при использовании рациональных параметров газопорошковой продувки расплава в процессе обработки на АКП возможно достичь содержания серы в готовой стали не более 0,003%. При этом для десульфурации, как правило, используются три вида материалов:

- шлаковые смеси на основе извести ( $\text{CaO}$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ );
- металлические порошки  $\text{SiCa}$ ,  $\text{CaC}_2$ ,  $\text{CaCN}_2$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{PЗМ}$ ;
- смеси шлаковых и металлических порошков ( $\text{CaO} - \text{SiCa}$ ,  $\text{CaO} - \text{CaC}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{Al}$ ,  $\text{CaO} - \text{Mg}$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{SiCa}$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{Al}$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{SiCa} - \text{Al}$ ).

Наибольшее распространение получили смеси шлаковых и металлических порошков кальция, в особенности  $\text{SiCa}$  [93].

Необходимо отметить, что эффективность процесса десульфурации при газопорошковой продувке на АКП, помимо состава вдуваемой смеси в значительной степени определяется также продолжительностью и интенсивностью перемешивания формируемого шлака с металлом [94].

Приводится информация [96], что содержание фосфора в готовой стали составляет не более 0,005% при использовании технологии продувки дефосфорирующими порошковыми материалами в ковше при обработке на АКП, так как в этом случае не будут играть роль такие факторы, как переход фосфора из футеровки в расплав и восстановление фосфора из сформированного шлака.

В целом использование газопорошковой продувки можно рассматривать, как альтернативный или дополнительный вариант ковшевой обработки расплава при использовании порошковой проволоки. Получение сопоставимых технологических результатов при меньших затратах позволяет считать данную технологию достаточно перспективной.

### **1.3 Выводы и постановка задач исследования**

Выполненный анализ литературных данных современного состояния теории и практики производства рельсовых сталей позволяет констатировать следующее:

- на протяжении периода массового производства отечественных рельсовых сталей имели место три основные тенденции в изменении их химического состава, заключающиеся в повышении содержания углерода, увеличении степени легирования сталей, в том числе легирования несколькими элементами одновременно, ужесточения требований по допустимому содержанию серы, фосфора, примесей цветных металлов, газов и загрязненности неметаллическими включениями;

- соблюдение требований действующих стандартов по основным параметрам качества рельсовых сталей, даже с учетом вышеуказанного постоянного повышения таких требований, не гарантирует отсутствие дефектов сталеплавленного происхождения в рельсах при их массовом производстве, так как фактически имеет место значительная отбраковка рельсов на предприятиях, производящих рельсы и высокая частота аварийного и преждевременного выхода из эксплуатации рельсов, установленных в пути;

- отличительной особенностью отечественного рельсового производства является преимущественная выплавка рельсовых сталей в дуговых электропечах с частичным замещением металлического лома твердым чугуном в металлошихте, что позволяет снизить содержание примесей цветных металлов в стали; при этом, однако, вопрос об оптимальной доле чугуна в металлозавалке электроплавки рельсовой стали с точки зрения оптимизации технико-экономических показателей

электросталеплавильного цеха остается дискуссионным.

Наиболее перспективными и эффективными технологическими решениями повышения качества рельсовых сталей в процессе выпечной обработки на сегодняшний день следует считать:

- совершенствование технологических режимов продувки стали инертным газом в ковше с целью рафинирования расплава от неметаллических включений;
- организацию вдувания порошкообразных реагентов в струе газа носителя в расплав в ходе обработки на АКП с целью глубокой десульфурации и дефосфорации металла.

Учитывая важность решения перечисленных проблем для развития теории и практики получения высококачественной рельсовой продукции в настоящей работе поставлены следующие задачи:

- установить механизм формирования дефектов рельсов металлургического происхождения, являющихся причинами их несоответствия требуемым параметрам качества, в том числе определить характер и степень влияния технологических параметров производства рельсовой электростали на образование таких дефектов;
- разработать статистическую модель прогнозирования отбраковки рельсов по дефектам металлургического происхождения при варьировании технологических параметров производства рельсовой стали;
- выполнить исследования эффективности перемешивания расплава рельсовой стали при продувке в сталеразливочном ковше инертным газом;
- с использованием численного моделирования получить новую информацию по характеристикам газопорошкового течения потоков в погружной фурме и рациональным параметрам продувки при подаче порошкообразных материалов в расплав рельсовой стали в процессе обработки на агрегате «ковш-печь»;
- разработать технологические решения по повышению качества рельсовых сталей, снижению отбраковки рельсов по внутренним дефектам металлургического происхождения;

- разработать математическую модель прогнозирования технико-экономических показателей электроплавки рельсовой стали при различном соотношении составляющих металлозавалки.

## **2 Исследования процессов формирования металлургического качества рельсов на различных этапах производства рельсовой стали**

### **2.1 Методика исследований**

Исследования проводились для условий электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и включали в себя три этапа.

На первом этапе исследовали:

- дефекты микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей текущего производства, в том числе загрязненность неметаллическими включениями;
- характерные дефекты рельсов, в том числе состав неметаллических включений в зонах локализации дефектов;
- развитие химической неоднородности в непрерывнолитых заготовках и рельсах.

Для исследования дефектов микроструктуры непрерывнолитых заготовок и их загрязненности неметаллическими включениями использовали металлографический микроскоп OLYMPUS GX-51. При этом загрязненность неметаллическими включениями оценивали полуколичественным методом по стандартной методике согласно ГОСТ 1778-2022. Определение вида характерных неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках проводили с использованием растрового электронного микроскопа «Philips SEM 515».

Исследования характерных дефектов рельсов проводили методом оптической микроскопии (микроскоп OLYMPUS GX-51), исследования неметаллических включений в области локализации дефектов рельсов – с помощью рентгенофазового анализа (дифрактометр «Shimadzu XRD-6000»). Химическую неоднородность по сечению непрерывнолитых заготовок и рельсов оценивали путем анализа химического состава проб, отобранных от различных

зон заготовок и различных элементов рельсовых профилей, методом рентгеноспектрального анализа (спектрометр Shimadzu XRF-1800).

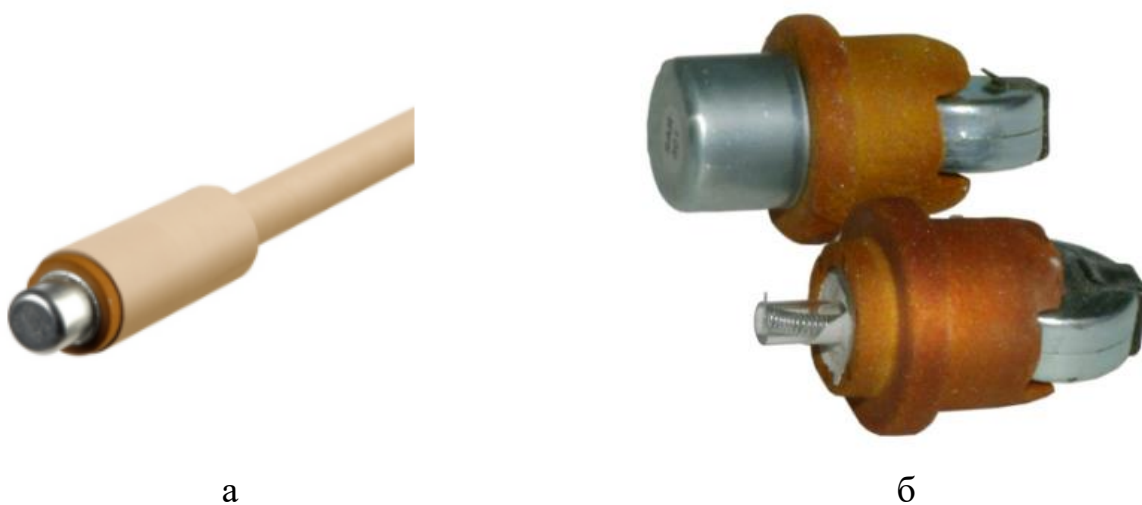
В качестве объектов исследования на первом этапе использовали заготовки 50-ти плавок рельсовой стали Э76ХФ и рельсы 50-ти плавок указанной стали (по одному рельсу от каждой плавки).

На втором этапе исследовали влияние параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали в сталеразливочном ковше на отбраковку рельсов из-за наличия внутренних дефектов. При проведении исследований использован метод пассивного эксперимента (регрессионный анализ паспортов плавок рельсовой стали текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК»). В качестве объекта статистического анализа выступила выборка из 200 плавок рельсовой стали марки Э76ХФ, произведенных в различные временные периоды. Это позволило обеспечить воспроизводимость полученных данных и снизить их погрешность.

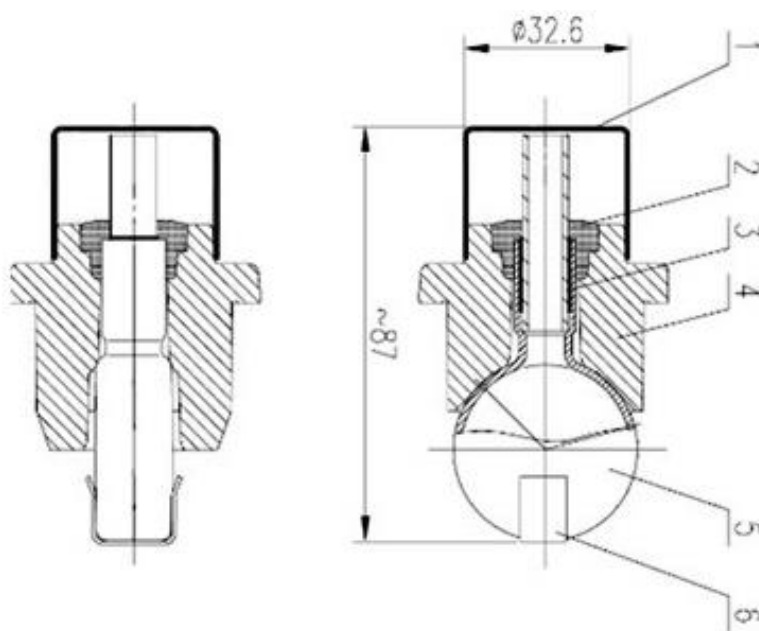
На третьем этапе проведены металлографические исследования (микроскоп OLYMPUS GX-51) загрязненности рельсовой стали неметаллическими включениями для плавок с условно «благоприятным» (10 плавок) и «неблагоприятным» (10 плавок) сочетанием технологических параметров, оказывающих значимое влияние на образование металлургических дефектов (перечень параметров определен по результатам предыдущего этапа статистических исследований). Исследованы пробы жидкой стали после внепечной обработки и пробы от непрерывнолитых заготовок стали марки Э76ХФ. Для отбора проб использовали одноразовые погружные пробоотборники (рисунок 2.1 а), состоящие из запрессованной в бумажную гильзу головки (рисунок 2.1 б). Такая гильза сформирована из стальной изложницы, закрепленной в песчаном теле и закрытой шлакозащитным колпачком (рисунок 2.2). Пробоотборник приведенной конструкции одевается на манипулятор. Продолжительность погружения в расплав составляет 5-10 секунд, глубина погружения находится ниже уровня шлака, но не превышает 2/3 от длины пробоотборника. В процессе погружения колпачок расплавляется и жидкая сталь

по кварцевой трубке поступает в изложницу. Проба, полученная при помощи пробоотборника, может иметь вид круга или овала (рисунок 2.3).

Исследования загрязненности неметаллическими включениями на пробах жидкой стали проводили с использованием стандартной методики металлографического анализа, рекомендованной ГОСТ 1778-2022 для исследования микроструктуры литой (недеформированной) стали (методика Л2 согласно ГОСТ 1778-2022).



а – общий вид; б – головка пробоотборника  
Рисунок 2.1 – Погружной пробоотборник



1 – стальной защитный колпачок; 2 – мастика; 3 – кварцевая трубка; 4 – песчаное тело; 5 – стальная изложница; 6 – стальная скоба  
Рисунок 2.2 – Схема погружного пробоотборника



Рисунок 2.3 – Общий вид пробы, полученной пробоотборником

По данной методике загрязненность включениями плавки определяется по формуле:

$$И = \frac{b \cdot \sum a_i \cdot m_i}{l} \quad (2.1)$$

где  $b$  – цена деления окулярной шкалы при данном увеличении в мкм;

$a_i$  – среднее значение размеров включений в делениях окулярной шкалы;

$m_i$  – количество включений данной группы;

$l$  – длина подсчета в мкм.

Фиксация включений производится под микроскопом на нетравленных шлифах при увеличении в 500 крат. Для этого шлиф расчерчивают параллельными линиями таким образом, чтобы выбранная длина для подсчета была не менее 3 см и охватывала периферийные и центральные зоны литых проб; затем шлиф перемещают в одном направлении вдоль отмеченных линий, измеряют максимальные размеры включений и фиксируют их в соответствии с группами.

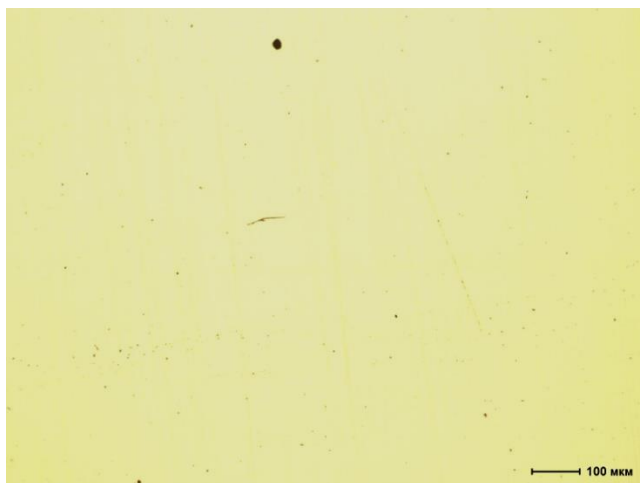
Для оценки загрязненности неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали производили отбор проб с помощью

пил холодной резки. Из полученных проб шириной порядка 200 мм проводили вырезку темплетов, после чего из различных зон темплетов вырезали образцы, что имело целью нивелировать влияние режимов охлаждения в процессе непрерывной разливки стали. Загрязненность неметаллическими включениями оценивали по стандартной методике согласно ГОСТ 1778-2022. Указанная методика заключается в сравнении неметаллических включений, выявленных в шлифах при увеличении в 100 крат, со стандартными (эталонными) пятибалльными шкалами – наименее загрязненные пробы оцениваются баллом 1, а наиболее загрязненные оцениваются баллом 5. При этом площадь, занимаемая включениями, возрастает при переходе к последующим баллам в геометрической прогрессии с множителем 2.

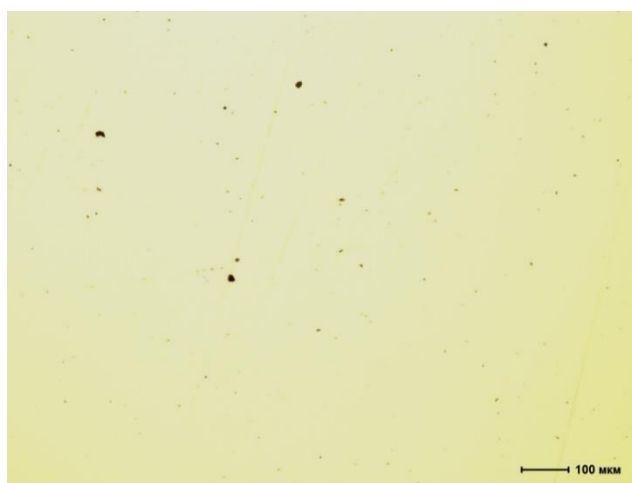
Согласно указанной шкале оцениваются неметаллические включения следующих видов: оксиды строчечные, оксиды точечные, силикаты хрупкие, силикаты пластичные, силикаты недеформирующиеся, сульфиды; нитриды и карбонитриды строчечные, нитриды и карбонитриды точечные, нитриды алюминия.

## **2.2 Исследования качества структуры непрерывнолитых заготовок и дефектов рельсов металлургического происхождения**

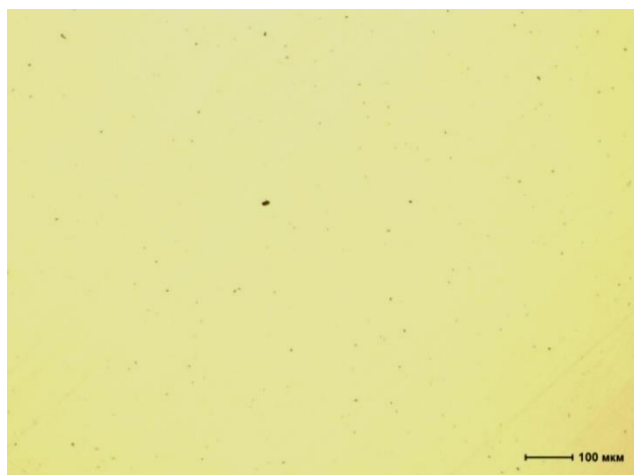
Металлографические исследования структуры заготовок стали Э76ХФ проводили по зонам кристаллизации (корковая зона, зона, столбчатых кристаллов, центральная зона). Исследованиями загрязненности непрерывнолитых заготовок стали Э76ХФ и произведенных из них рельсов неметаллическими включениями, проведенными методом оптической микроскопии, показано [97, 98], что в исследуемых заготовках металл корковой зоны и зоны столбчатых кристаллов является достаточно чистым по включениям (рисунок 2.4). При этом загрязненность осевой (центральной) зоны заготовок неметаллическими включениями значимо выше (рисунок 2.5).



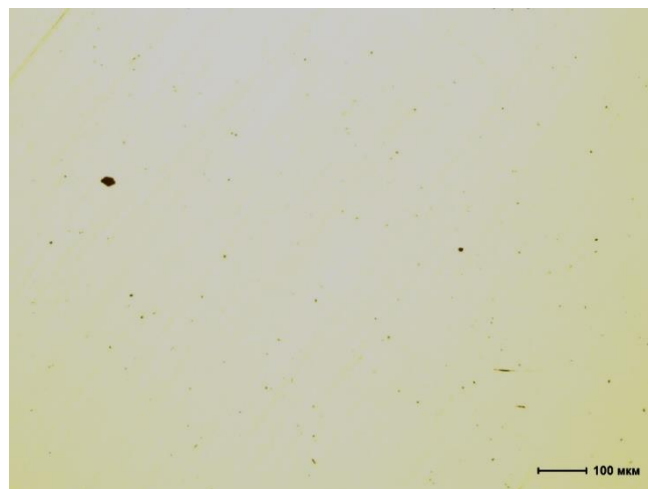
а



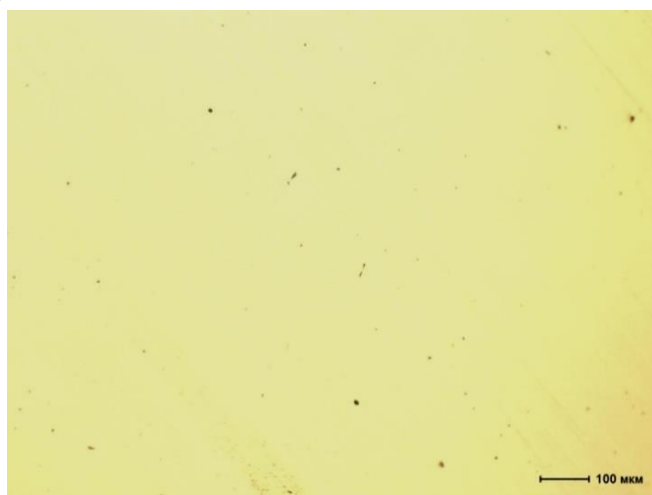
б



в

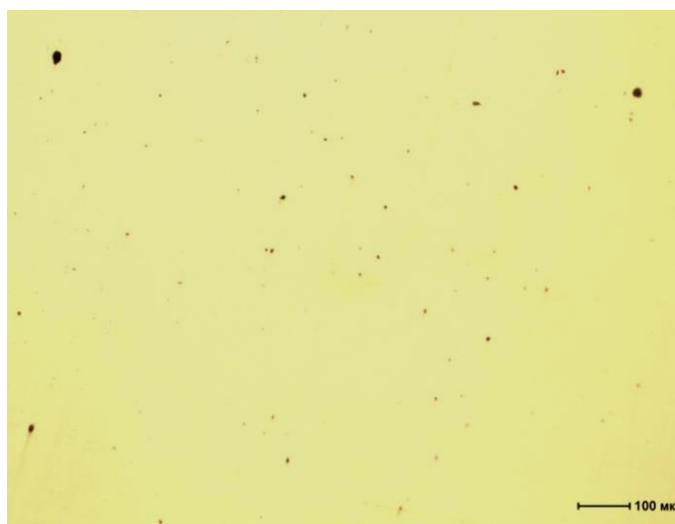


г

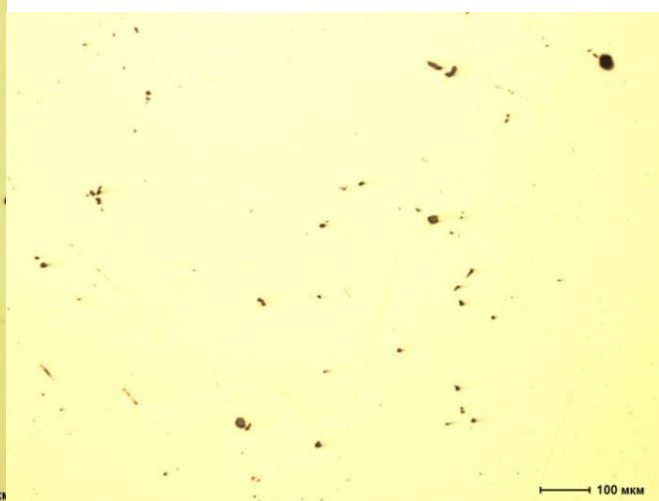


д

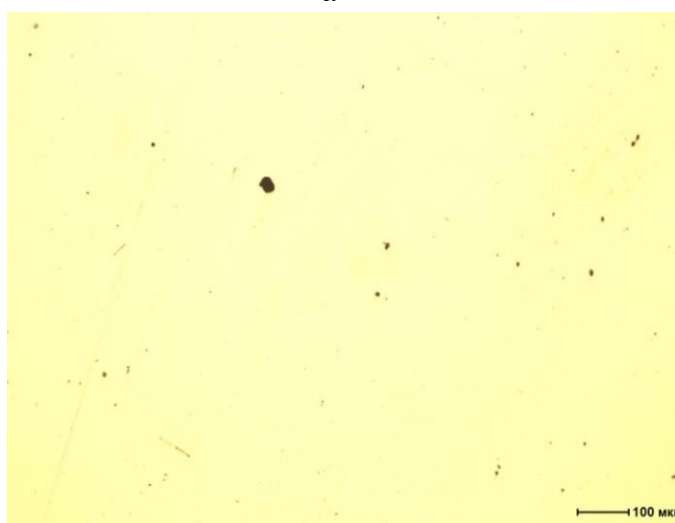
Рисунок 2.4 – Характерные неметаллические включения в корковой зоне и зоне столбчатых кристаллов непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ: оксиды точечные баллов 1а (а) и 2а (б); силикаты недеформирующиеся баллов 1а (в) и 1б (г); сульфиды балла 1б (д)



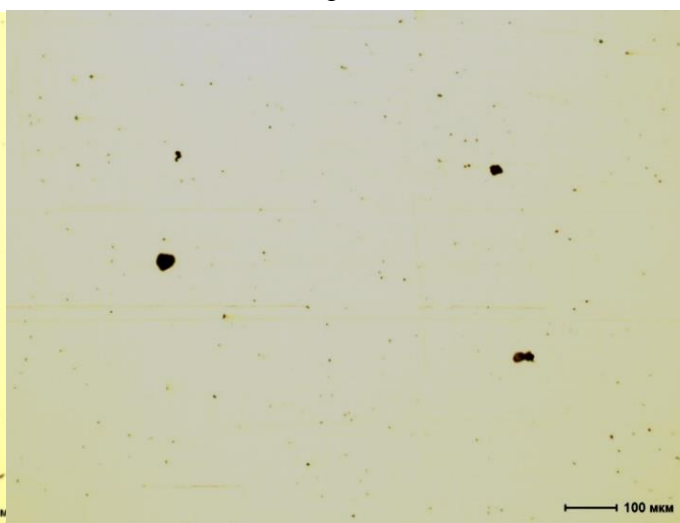
а



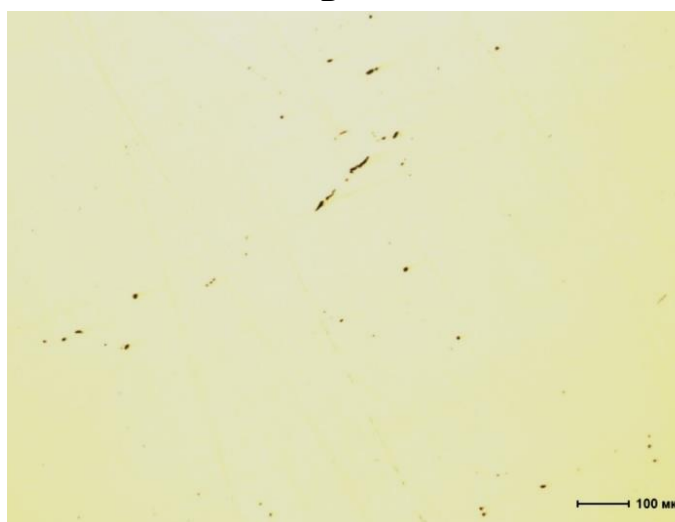
б



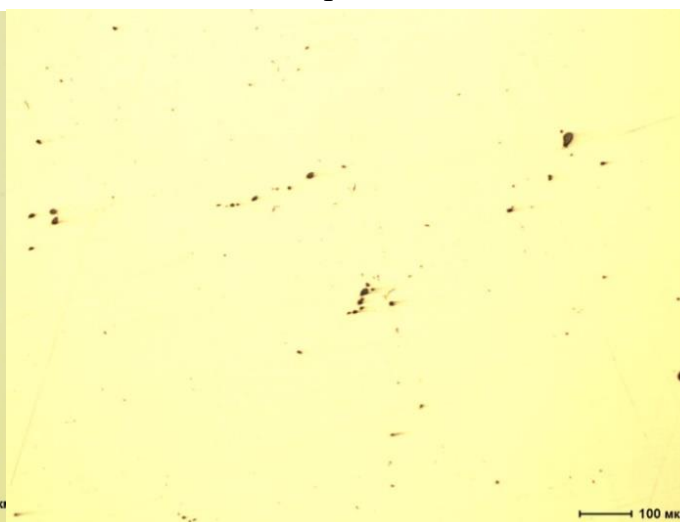
в



г



д



е

Рисунок 2.5– Характерные неметаллические включения в центральной зоне непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ: оксиды точечные баллов 3а (а) и 4а (б); силикаты недеформирующиеся баллов 3б (в) и 4б (г); сульфиды балла 2б (д); оксиды строчечные балла 3б (е)

С использованием метода электронной микроскопии установлено, что выявленные неметаллические включения центральной зоны непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ преимущественно представляют собой сульфиды марганца (рисунок 2.6 а), оксиды кремния (рисунок 2.6 б) и алюминия (рисунок 2.6 в), а также силикаты алюминия (рисунок 2.6 г).

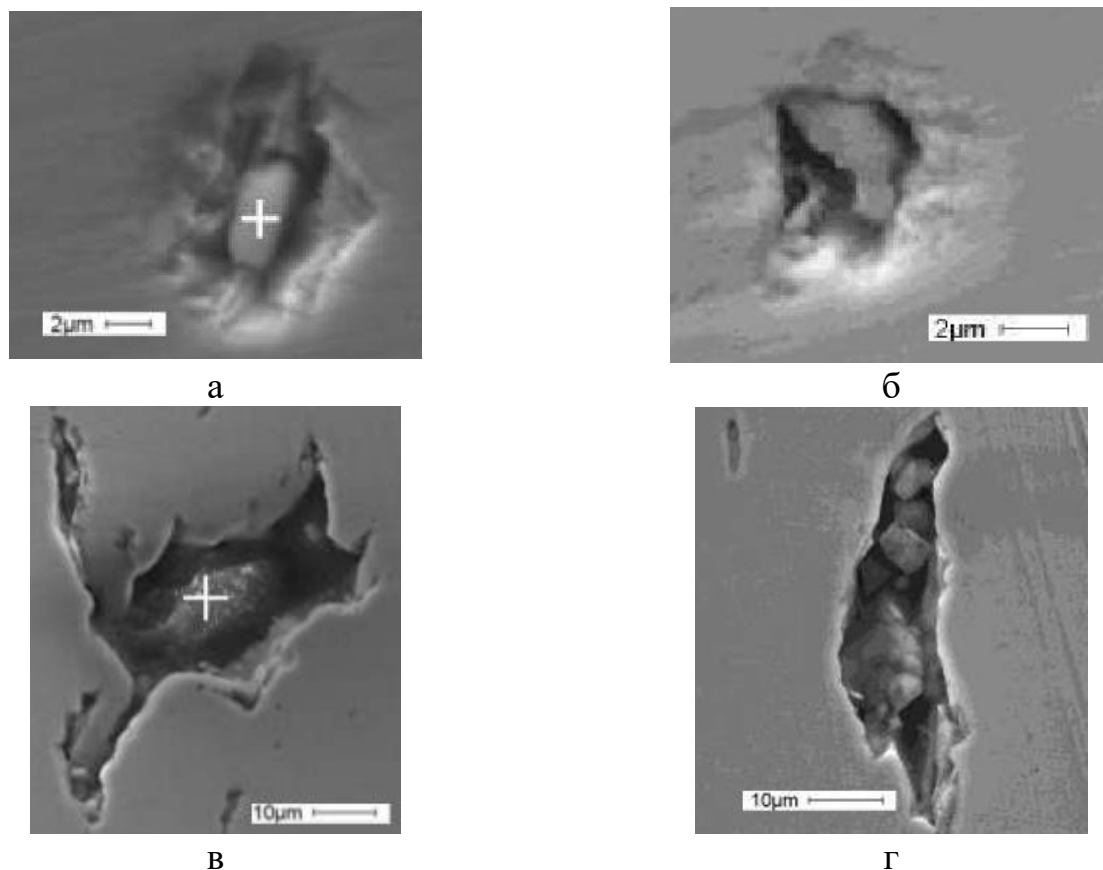


Рисунок 2.6 – Характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали Э76ХФ:  
а –  $\text{MnS}$ ; б –  $\text{SiO}_2$ ; в –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; г –  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$

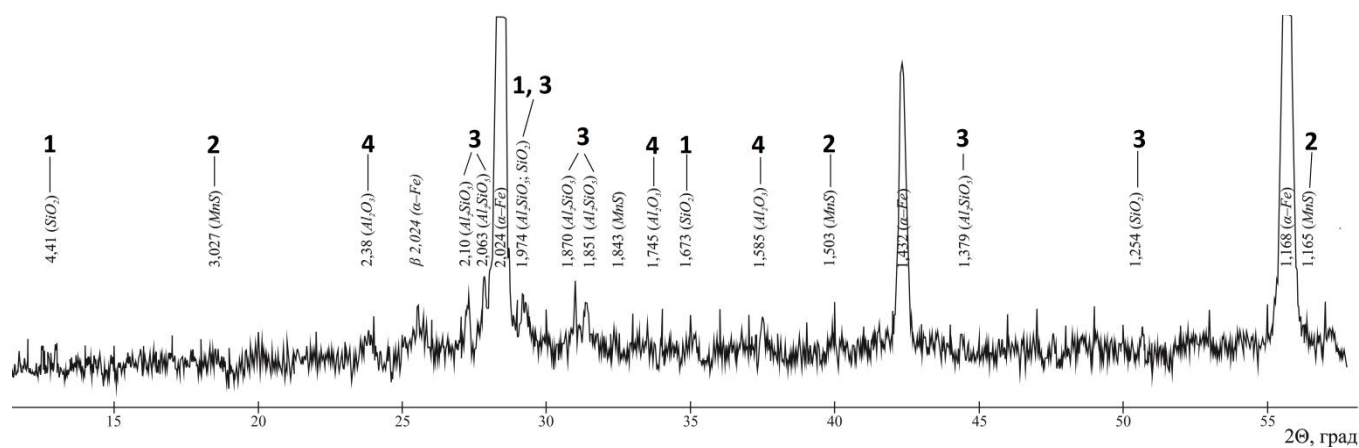
Следует отметить, что ранее в рамках диссертационной работы Симачева А.С. [99] в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали марки Э76Ф, произведенных в электрошлаковом цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2014 г., выявлены все перечисленные типы включений кроме  $\text{SiO}_2$ ; при этом значительное распространение согласно результатам указанной работы [99] имеют силикаты железа ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) и марганца ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Это с одной стороны свидетельствует о хорошей корреляции полученных данных и с другой стороны – об актуальности проведения таких исследований в связи с изменением технологических режимов раскисления рельсовой стали в период с 2014 г.

Металлографические исследования характерных дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле в потоке производства, позволили установить, что они представляют собой расслоения (внутренние трещины) со скоплениями неметаллических включений. Такие дефекты преимущественно располагаются в шейке рельсовых профилей (соответствует центральной зоне исходных заготовок) и имеют длину до 2 мм [100, 101]. Фрагменты характерного дефекта отбракованного рельса из стали Э76ХФ представлены на рисунке 2.7. При этом рентгенофазовым анализом в зоне расположения дефекта выявлены скопления включений, являющихся характерными, как показано выше, и для непрерывнолитых заготовок, а именно включений силиманита (силиката алюминия), непластичных оксидов алюминия и кремния, а также сульфидов марганца (рисунок 2.8).



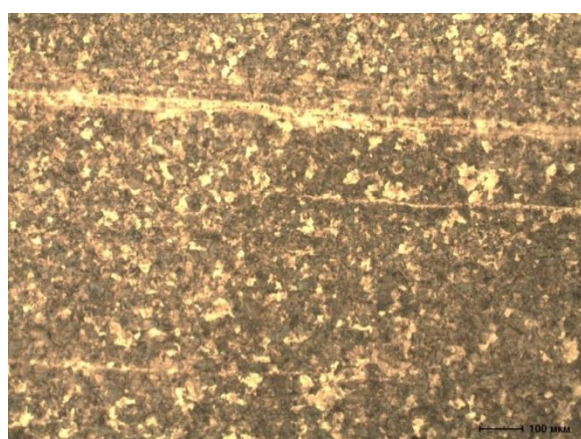
Рисунок 2.7 – Фрагменты расслоения в шейке рельса стали Э76ХФ соответствующие концевым участкам дефекта

Металлографические исследования микроструктуры рельсов текущего производства, успешно прошедших ультразвуковой контроль их качества (не отбракованных рельсов) показали, что в ряде таких рельсов имеется химическая неоднородность, локализованная в шейке рельсовых профилей [97, 98]. Указанная химическая неоднородность имеет вид светлых полос, вытянутых в направлении прокатки (рисунок 2.9 а); при этом внутри указанных полос расположены неметаллические включения (рисунок 2.9 б-г).

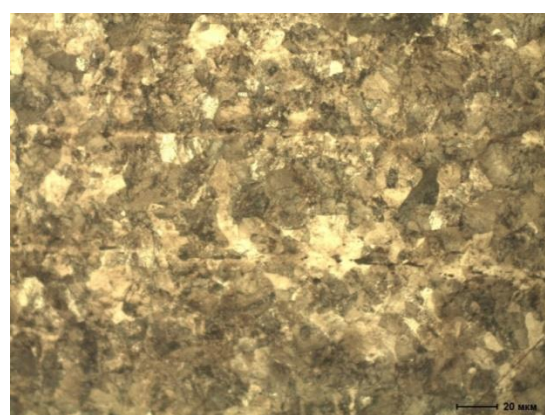


1 –  $\text{SiO}_2$ ; 2 –  $\text{MnS}$ ; 3 –  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ; 4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$

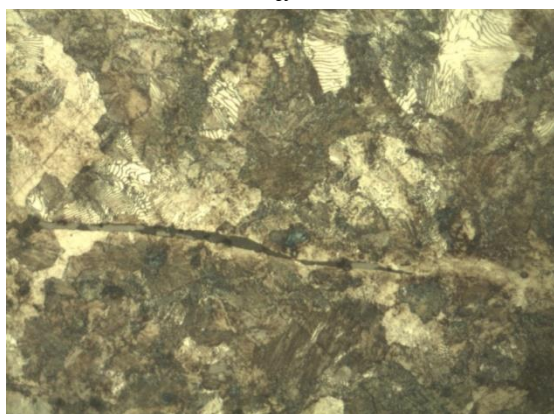
Рисунок 2.8 – Рентгенограмма области расслоения в шейке рельса стали Э76ХФ



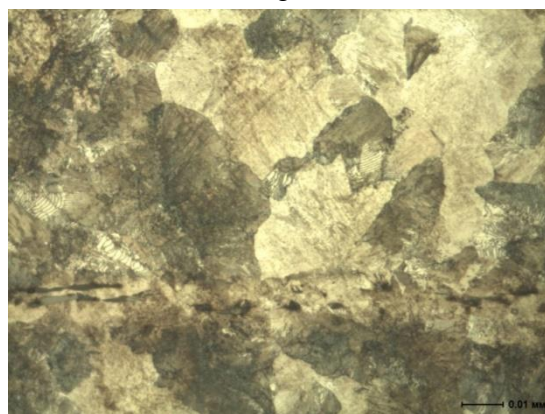
а



б



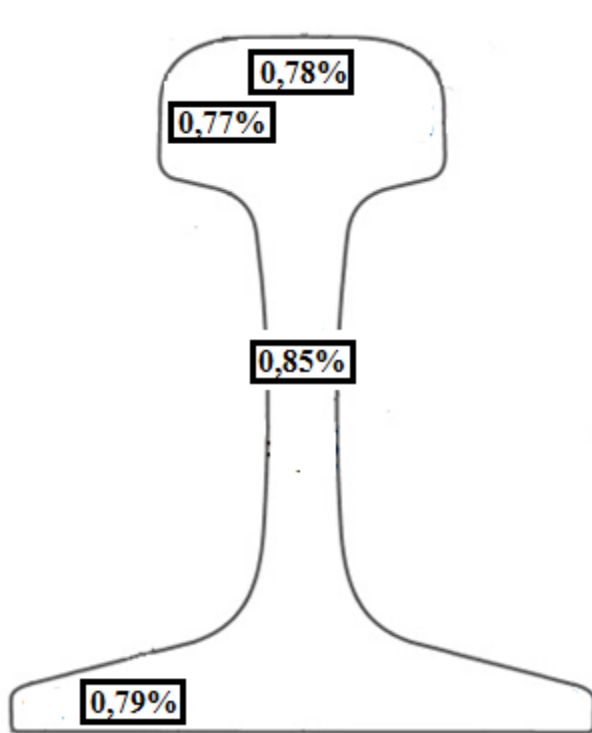
в



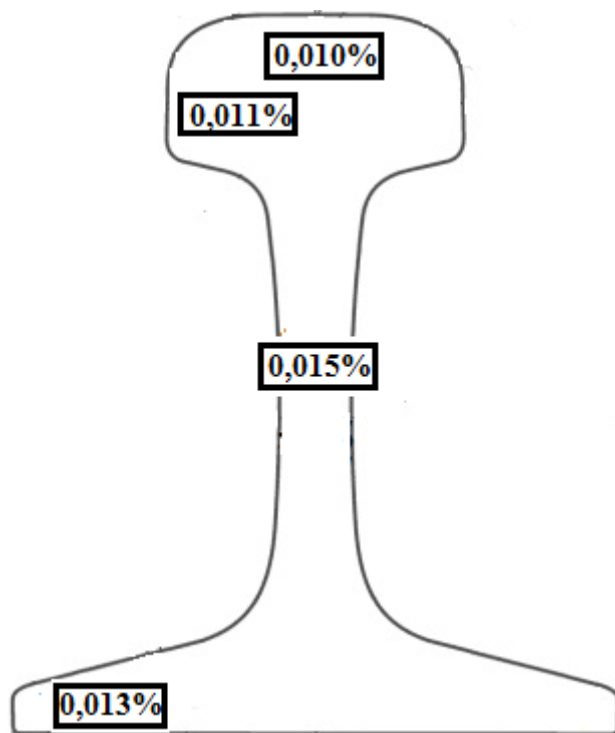
г

Рисунок 2.9 – Химическая неоднородность в шейке рельсов из стали Э76ХФ:  
а – общий вид структуры шейки рельса; б – общий вид расположения неметаллических включений в области химической неоднородности;  
в, г – неметаллические включения

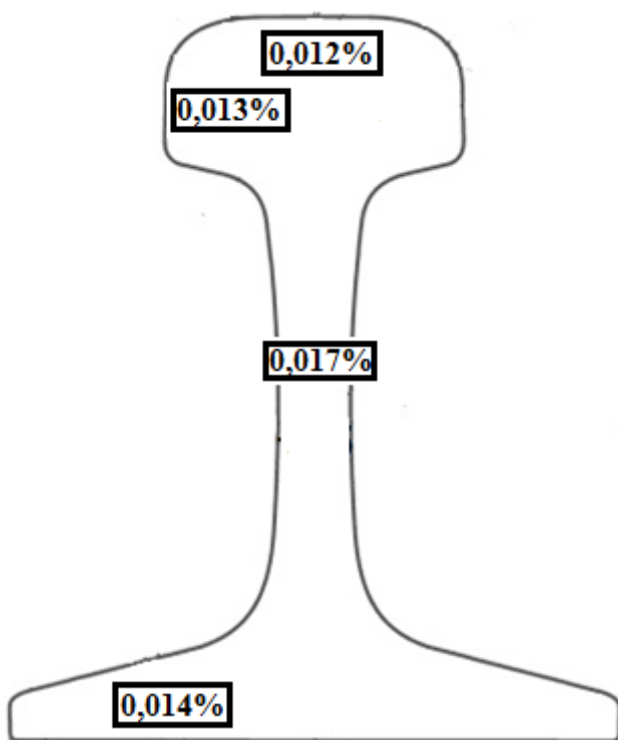
Также установлено, что ликвация углерода, серы и фосфора по элементам рельсовых профилей (рисунок 2.10) в целом аналогична неравномерности распределения указанных элементов по сечению непрерывнолитых заготовок (рисунок 2.11).



а



б



в

Рисунок 2.10 – Ликвация углерода (а), серы (б) и фосфора (в) по элементам рельсовых профилей из стали Э76ХФ

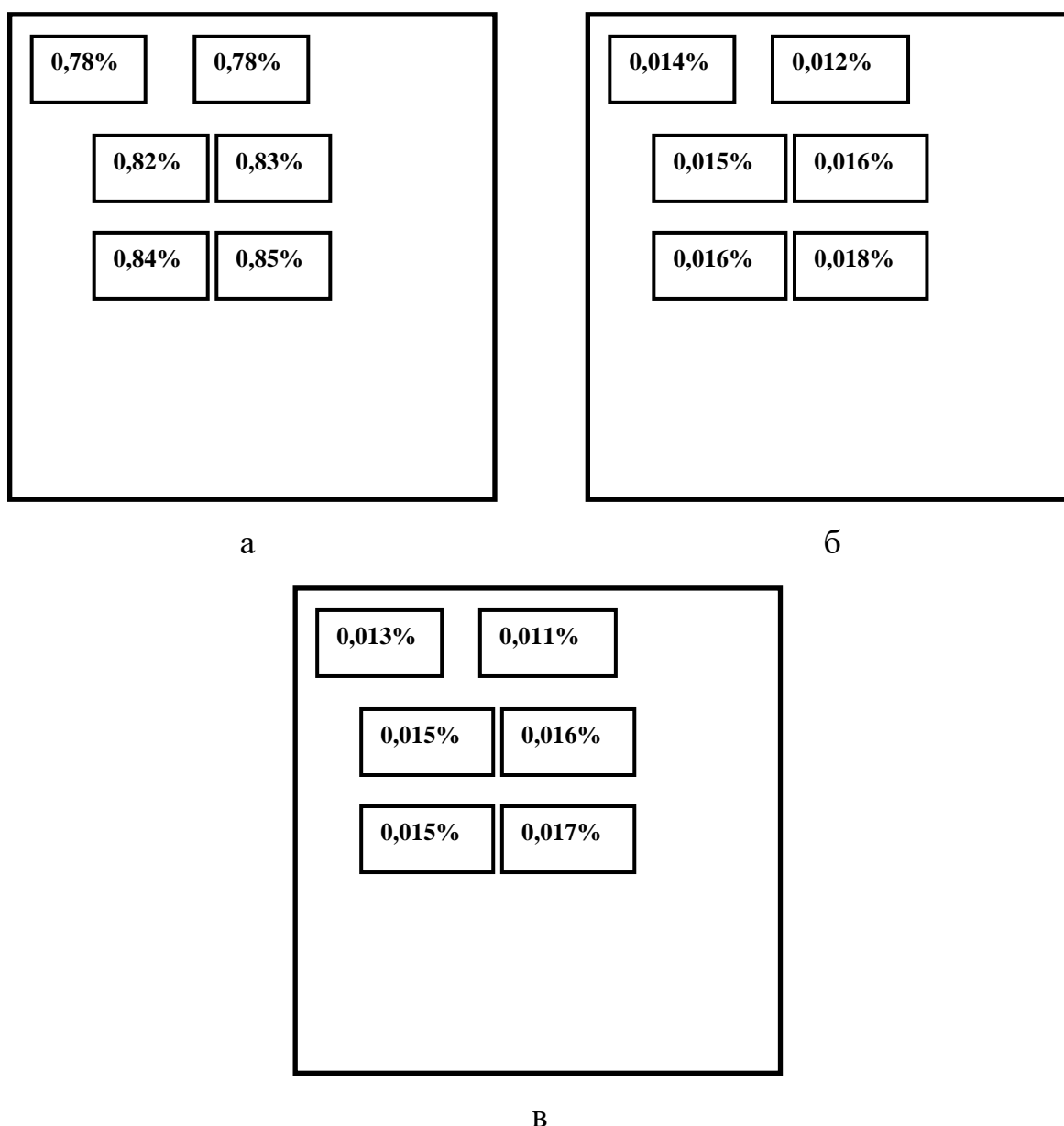


Рисунок 2.11 – Ликвация углерода (а), серы (б) и фосфора (в) по сечению непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки Э76ХФ

### 2.3 Исследования влияния параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали на образование внутренних дефектов рельсов

Исходя из анализа литературных данных и перечня параметров, инструментально фиксируемых в рассматриваемом электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК», для анализа выбрали следующие параметры:

- доля чугуна в металлозавалке;

- окисленность стали перед выпуском из печи;
- удельные расходы шлакообразующих материалов (флюс ФОМИ, известь, плавиковый шпат), раскислителей и науглероживателей (карбид кальция, карбид кремния, коксовая мелочь) на выпуске стали из печи в ковш;
- температура выпуска стали из печи;
- химический состав стали на выпуске из печи;
- длительность и интенсивность продувки аргоном и азотом при обработке на АКП;
- температура окончания обработки стали на АКП;
- удельные расходы шлакообразующих материалов (известь, плавиковый шпат) и науглероживателей (коксовая мелочь) при обработке на АКП;
- химический состав шлака АКП (содержание оксидов и основность);
- длительность обработки под вакуумом;
- интенсивность продувки в процессе вакуумирования;
- длительность и интенсивность очистительной продувки после снятия вакуума;
- температура окончания вакуумной обработки;
- расход шлакообразующих в процессе вакуумной обработки (плавиковый шпат).

Фактический интервал изменения вышеприведенных параметров и их статистические характеристики (средние значения и стандартные отклонения) представлены в таблице 2.1.

На основании результатов множественного регрессионного анализа установлено [102], что значимое влияние на отбраковку рельсов по внутренним дефектам оказывают такие параметры, как: окисленность стали на выпуске из ДСП, длительность и интенсивность продувки инертным газом при обработке на АКП; содержание серы, фосфора, меди и олова в готовой стали:

$$Br = -9,1 + 0,016[O] - 0,088 \cdot D_{пр} - 0,122 \cdot I_{пр} + 726,4[S] + 472,6[P] + 27[Cu] + 464,3[Sn], \quad (2.2)$$
где  $Br$  – отбраковка, %;  $[O]$  – содержание кислорода в стали (окисленность) на выпуске из печи в ковш, %;  $D_{пр}$  – длительность продувки инертным газом на

АКП, мин.;  $I_{пр}$  – интенсивность продувки инертным газом на АКП, м<sup>3</sup>/ч; [S], [P], [Cu] и [Sn] – содержание серы, фосфора, меди и олова в готовой стали, %.

Необходимо отметить, что полученный перечень технологических параметров производства рельсовой электростали в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», оказывающих значимое влияние на отбраковку рельсов, отличается от результатов ранее проведенных исследований в рамках диссертационной работы Уманского А.А. [103]. Данный факт обусловлен изменениями технологических режимов выплавки и внепечной обработки рельсовой стали, произошедшими с момента проведения указанных исследований.

Увеличение содержания кислорода в стали на выпуске из печи (перед раскислением стали в ковше), очевидно, повышает загрязненность стали первичными оксидными неметаллическими включениями, большая часть из которых являются непластичными (недеформируемыми) или хрупкоразрушенными (способными вытягиваться в строчки при деформации, но разрушающиеся при достижении некоторого ее предельного значения). К указанным включениям, в том числе, относятся выявленные в местах локализации дефектов силикаты алюминия, включения  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  (рисунок 2.8). Наличие скоплений таких включений приводит к образованию расслоений в процессе прокатки рельсов (рисунок 2.7).

Повышение длительности продувки расплава инертным газом в процессе обработки на АКП в рассматриваемом фактическом интервале изменения данных параметров способствует более полному удалению неметаллических включений из металла в шлак, что снижает вероятность формирования скоплений неметаллических включений и, соответственно уменьшает вероятность образования внутренних дефектов рельсов.

Исходя из физической природы процессов, протекающих при продувке расплава инертным газом в сталеразливочном ковше, существует пороговое значение продолжительности продувки, при превышении которого эффект от дальнейшего увеличения длительности продувки с точки зрения рафинирования расплава от неметаллических включений становится минимальным.

Таблица 2.1 – Статистические характеристики технологических параметров производства рельсовой стали и параметра оптимизации (отбраковки рельсов при ультразвуковом контроле их качества)

Наименование параметра	Единица измерения параметра	Интервал изменения параметра	Среднее значение параметра	Стандартное отклонение
Отбраковка рельсов	%	0-29,7	2,1	3,7
Доля чугуна в металлозавалке	%	13,8-51,2	32,9	11,4
Химический состав стали на выпуске из печи:				
- C	%	0,045-0,562	0,142	0,086
- Si	%	0,001-0,032	0,014	0,002
- Mn	%	0,061-0,281	0,062	0,042
- Cr	%	0,023-0,158	0,079	0,021
- V	%	0,001-0,017	0,003	0,002
- S	%	0,017-0,049	0,027	0,004
- P	%	0,003-0,015	0,007	0,002
- Cu	%	0,06-0,16	0,11	0,02
- Ni	%	0,04-0,12	0,07	0,01
Окисленность стали на выпуске из печи	ppm	158-684	377	88
Удельные расходы на 1 т жидкой стали на выпуске из печи в ковше:				
- флюс ФОМИ	кг/т	0,4-0,9	0,7	0,1
- известь	кг/т	2,4-6,7	5,1	0,4
- плавленый шпат	кг/т	0,4-1,2	0,9	0,2
- карбид кальция	кг/т	0,5-2,0	0,9	0,3
- карбид кремния	кг/т	1,3-5,1	2,4	0,5
- коксовая мелочь	кг/т	1,8-5,6	4,8	0,4
Температура выпуска стали из печи	°C	1630-1729	1673	17
Длительность продувки при обработке на АКП	мин.	40-128	59	12
Интенсивность продувки при обработке на АКП	м <sup>3</sup> /ч	20,1-54,8	30,3	4,3
Удельные расходы при обработке на АКП:				
- известь	кг/т	0,1-5,9	1,7	0,9
- плавленый шпат	кг/т	0,2-2,1	0,8	0,3
- коксовая мелочь	кг/т	0,2-8,2	2,9	0,9
Химический состав шлака АКП				
- CaO	%	40,9-54,6	52,4	2,9

Продолжение таблицы 2.1

Наименование параметра	Единица измерения параметра	Интервал изменения параметра	Среднее значение параметра	Стандартное отклонение
- SiO <sub>2</sub>	%	18,5-30,0	25,2	1,4
- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,6-11,8	4,7	1,0
- MnO	%	0,06-0,78	0,15	0,05
- MgO	%	3,0-54,3	9,7	4,1
- P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,03-0,06	0,04	0,01
- FeO	%	0,1-2,3	0,4	0,2
- S	%	0,47-1,87	1,14	0,23
- V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01-0,12	0,02	0,02
- Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,01-0,39	0,06	0,03
Основность шлака АКП	-	1,7-2,7	2,1	0,1
Температура окончания обработки стали на АКП	°C	1572-1666	1591	14
Длительность нахождения под вакуумом	мин.	17-41	21	4
Интенсивность продувки в процессе вакуумирования	м <sup>3</sup> /ч	7,8-32	11,2	4,5
Длительность очистительной продувки	мин.	6-30	13	4
Интенсивность очистительной продувки	м <sup>3</sup> /ч	10,2-88,8	19,9	7,8
Удельный расход плавикового шпата в процессе вакуумной обработки	кг/т	0,3-2,0	0,8	0,3
Содержание водорода в вакуумированной стали	ppm	0,5-1,5	0,9	0,2
Химический состав готовой стали:				
- C	%	0,75-0,79	0,77	0,01
- Si	%	0,53-0,59	0,56	0,01
- Mn	%	0,76-0,80	0,78	0,01
- Cr	%	0,37-0,43	0,41	0,01
- V	%	0,03-0,04	0,04	0,001
- S	%	0,004-0,013	0,008	0,002
- P	%	0,007-0,018	0,011	0,002
- N	%	0,006-0,012	0,009	0,001
- Cu	%	0,06-0,15	0,10	0,02
- Ni	%	0,04-0,19	0,07	0,01
- Ti	%	0,002-0,004	0,0025	0,0005
- Mo	%	0,010-0,020	0,010	0,0004
- Nb	%	0,001-0,003	0,002	0,0005
- Sn	%	0,003-0,011	0,005	0,001
- Sb	%	0,001-0,004	0,0013	0,0005

Применительно к данному исследованию указанное пороговое значение, очевидно находится вне фактического интервала изменения длительности продувки инертным газом [104, 105], так как зависимости содержания кислорода в виде высокоглиноземистых неметаллических включений в готовых рельсах и кислорода общего (показатели контролируется в соответствии с требованиями ГОСТ 51685-2013) являются линейными (рисунок 2.12).

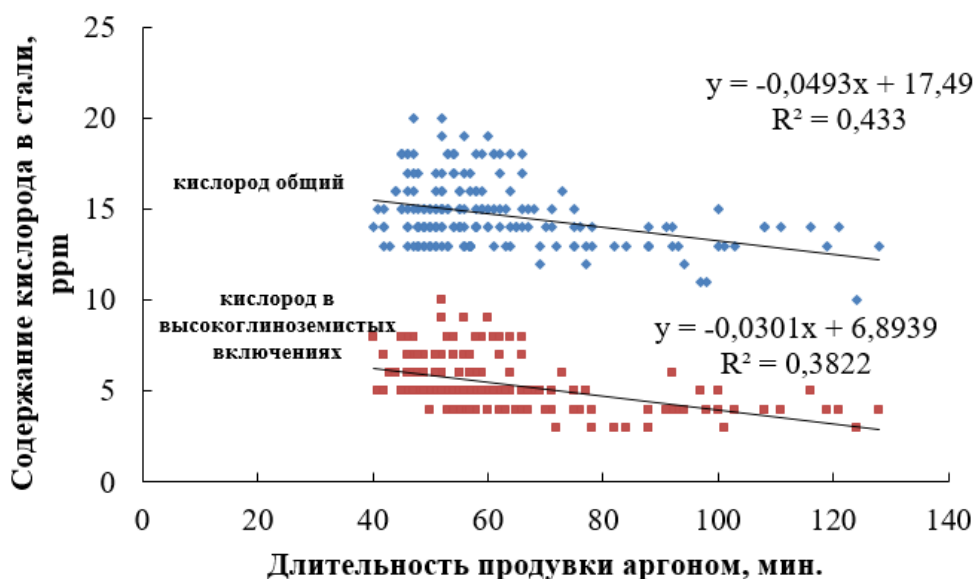


Рисунок 2.12 – Влияние продолжительности продувки рельсовой стали инертным газом при обработке на АКП на содержание неметаллических включений в рельсах

Применительно к интенсивности продувки в отличие от длительности продувки при превышении порогового значения происходит не просто минимизация эффекта по снижению загрязненности стали неметаллическими включениями, а имеет место обратный эффект, так как частицы шлака затягиваются в металл потоками газа. Кроме того, при увеличении расхода сверх определенного предела перемешивание ванны ухудшается за счет того, что увеличивается размер пузырей, а не их количество; крупные пузыри сливаются в сплошные газовые потоки [106]. В результате и вынос частиц из объема к границе «шлак – металл» замедляется. Также слишком интенсивное перемешивание ванны металла вызывает разрушение образовавшихся крупных неметаллических

включений, тем самым ухудшая условия для их удаления. В фактическом диапазоне изменения интенсивности продувки на рассматриваемой выборке плавок указанное пороговое значение не было превышено, о чем свидетельствует линейная взаимосвязь между удельным расходом аргона на продувку и отбраковкой рельсов.

Влияние содержания серы на образование дефектов готового проката в большинстве случаев связывают с явлением «красноломкости» – пониженной пластичностью металла при температурах горячей прокатки, обусловленной формированием легкоплавких эвтектик FeS по границам зерен. При этом, как показано выше и соотносится с высоким содержанием марганца в рельсовой стали, в местах локализации дефектов рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» обнаруживаются преимущественно сульфиды марганца (рисунок 2.8), считающиеся менее опасными с точки зрения трещинообразования. Механизм влияния данных включений на образование дефектов рельсов заключается в следующем. Включения MnS формируются в процессе кристаллизации стали; при этом за счет того, что их коэффициент линейного расширения ниже по отношению к основному металлу в случае наличия включений MnS относительно большого размера или их скоплений между включениями и основным металлом после затвердевания формируются микропустоты. Заваривание указанных пустот в процессе дальнейшей горячей прокатки не происходит по причине различной пластичности включений MnS и основного металла, а также наличия непластичных оксидных включений в местах локализации дефекта.

Механизм отрицательного влияния повышенного содержания меди и олова на качество стального проката заключается в увеличении вероятности образования трещин за счет снижения горячей пластичности стали. Примеси цветных металлов имеют значительную склонность к ликвации, что обуславливает их выраженное отрицательное воздействие на качество стальных изделий даже при относительно низких среднетемпературных концентрациях таких элементов в стали.

Следует отметить, что, хотя допустимое содержание олова, в отличие от

меди, не регламентирована в действующей нормативной документации, имеющиеся данные различных исследователей свидетельствуют о выраженном отрицательном влиянии данного элемента на качество стальной металлопродукции даже при его низкой абсолютной концентрации. Так, например, авторами работы [107] показано, что минимальная отсортировка проката из различных марок стали по внутренним дефектам имеет место при концентрациях олова на уровне не более 0,0006% и при условии суммарной концентрации свинца, сурьмы, олова, цинка и висмута – не более 0,0046%. Авторами работы [108] приводятся данные об интенсивном росте трещин при содержании в стали: свинца – более 0,0056%, сурьмы – более 0,0038%, олова – более 0,0060%, висмута – более 0,0052%. Механизм отрицательного воздействия олова на качество стального проката связан с его ликвацией в междендритных зонах, что подтверждено в исследовании [107] методом Оже-электронной спектроскопии. Таким образом, повышение содержания олова в рельсовых сталях в имеющихся пределах изменения концентрации данного элемента может рассматриваться, как значимый фактор ухудшения качества таких сталей, несмотря на отсутствие пороговых (допустимых) значений содержания данных элементов в нормативной документации.

Влияние фосфора на вероятность образования дефектов также связано со снижением пластичности стали и обусловлено скоплениями мелких включений фосфидов по границам зерен металла.

Исходя из природы характерных дефектов рельсов, определенной в разделе 2.2, в данном случае повышенное содержание меди, олова и фосфора в стали выступают в качестве дополнительных факторов, снижающих ее пластичность. Основное же влияние на образование дефектов оказывает формирование скоплений непластичных оксидных включений, а также включений MnS.

Коэффициент множественной детерминации между перечисленными технологическими параметрами и отбраковкой рельсов составил 0,76, то есть совокупное относительное влияние параметров ковшевой обработки рельсовой стали и ее химического состава на отбраковку рельсов по внутренним дефектам

составляет 76%. Оставшиеся 24% необъясненной вариации относится к влиянию параметров разливки стали, находящихся за рамками данного исследования, и организационных факторов.

Проведенный анализ (рисунок 2.13) показал, что вышеприведенные параметры производства рельсовой стали (уравнение 2.2) в порядке убывания их относительной степени влияния на вероятность образования внутренних дефектов рельсов распределяются следующим образом: длительность продувки инертным газом, окисленность стали на выпуске из печи, содержание серы в стали, содержание фосфора в стали, интенсивность продувки инертным газом, содержание олова в стали, содержание меди в стали.

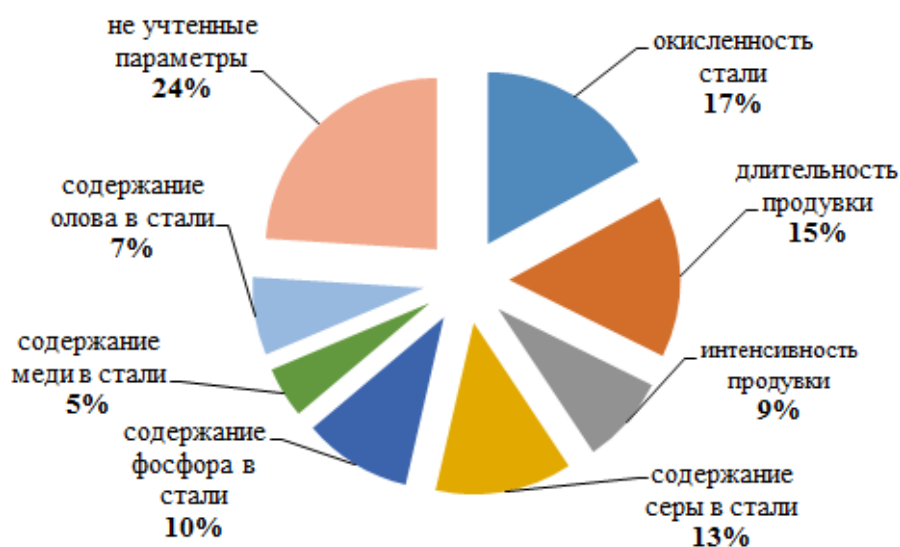


Рисунок 2.13 – Относительное влияние параметров производства рельсовой стали на отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения

Исследованиями проб от расплава рельсовой стали после внепечной обработки, проведенными с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, определено, что при минимальных значениях продолжительности и интенсивности продувки инертным газом в ковше и максимальной окисленности стали на выпуске из печи (в рамках рассматриваемого интервала изменения указанных параметров – таблица 2.2) загрязненность расплава неметаллическими включениями выше в 1,28 раза по сравнению с наиболее благоприятным сочетанием данных факторов (повышенной длительностью и интенсивностью продувки и наименьшей окисленностью стали).

Таблица 2.2 – Загрязненность неметаллическими включениями расплава рельсовой стали Э76ХФ после внепечной обработки

Сочетание технологических параметров	Интервал изменения технологических параметров			Загрязненность расплава неметаллическими включениями (И)
	длительность продувки инертным газом в ковше, мин.	интенсивность продувки инертным газом в ковше, м <sup>3</sup> /ч	окисленность стали на выпуске из печи, ppm	
«благоприятное»	40-46	23,8-27,4	552-578	18
«неблагоприятное»	114-128	46,3-50,1	172-199	23

На основании исследований проб непрерывнолитых заготовок, проведенных методом оптической микроскопии, установлено аналогичное влияние вышеприведенных факторов на загрязненность оксидными, силикатными и сульфидными неметаллическими включениями. Определено, что оксидные, силикатные и сульфидные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках от плавок, на которых имела место высокая окисленность стали на выпуске из печи в сочетании с низкой продолжительностью и интенсивностью продувки инертным газом в ковше, имеют больший размер и концентрацию чем при обратном сочетании значений указанных параметров (низкая окисленность стали при повышенной длительности и интенсивности продувки инертным газом) – таблица 2.3.

Таблица 2.3 – Загрязненность неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ

Сочетание технологических параметров	Максимальный балл неметаллических включений по ГОСТ 1778-2022				
	Силикаты недеформирующиеся	Силикаты пластичные	Оксиды точечные	Оксиды строчечные	Сульфиды
«благоприятное»*	2 б	2 а	1 а	-	1 б
«неблагоприятное»**	5 а	3 а	4 а	4 а	3 б

\* длительность продувки инертным газом в ковше – 43-48 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше – 22,4-29,6 м<sup>3</sup>/ч; окисленность стали на выпуске из печи – 565-589 ppm

\*\* длительность продувки инертным газом в ковше – 105-119 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше – 45,4-49,2 м<sup>3</sup>/ч; окисленность стали на выпуске из печи – 186-201 ppm

При этом, необходимо отметить, что в непрерывнолитых заготовках от ряда плавков с «неблагоприятным» сочетанием параметров встречаются неметаллические включения крупных размеров (рисунки 2.14, 2.15).

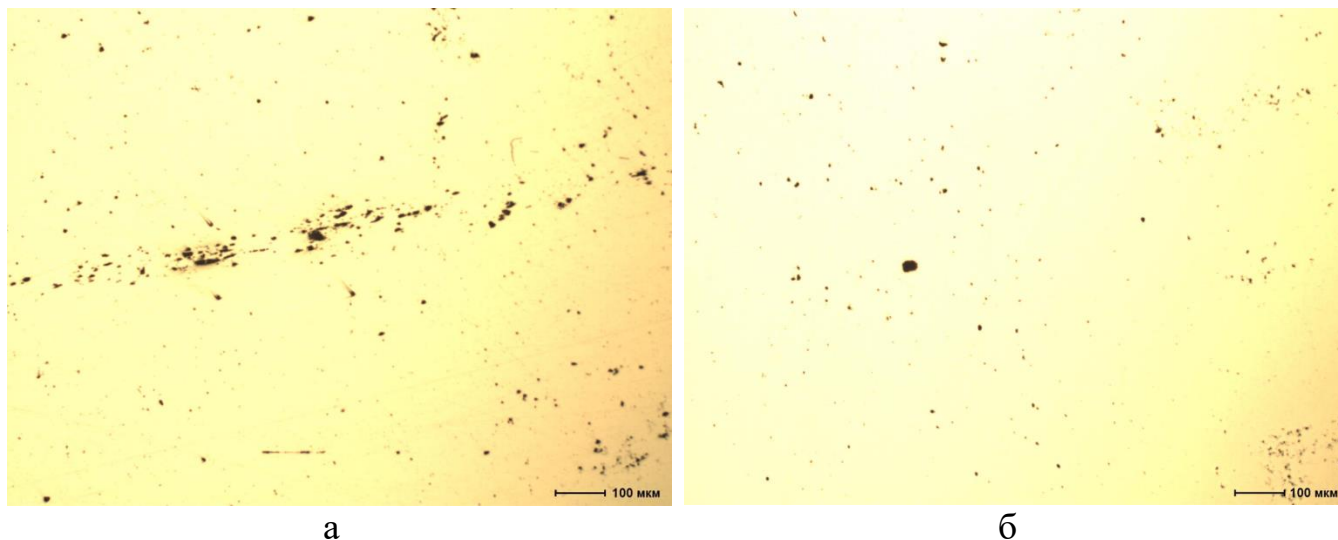


Рисунок 2.14 – Оксидные включения в пробах рельсовой стали Э76ХФ на плавках с повышенной окисленностью стали и пониженными длительностью и интенсивностью продувки инертным газом в ковше:  
а – оксиды строчечные балла 4а; б – оксиды точечные балла 4а

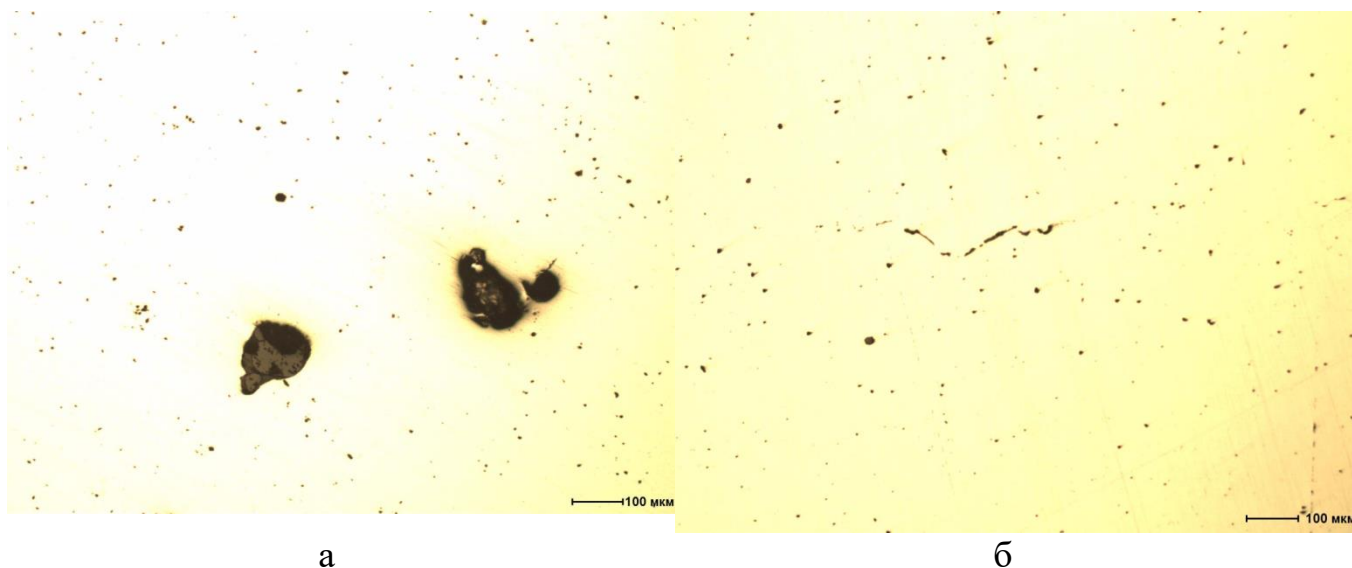


Рисунок 2.15 – Неметаллические включения в пробах рельсовой стали Э76ХФ на плавках с повышенной окисленностью стали и пониженными длительностью и интенсивностью продувки инертным газом в ковше:  
а – силикаты недеформирующиеся баллов 4а, 5а; б – силикаты пластичные балла 3 а

Таким образом, подтверждено снижение загрязненности расплава рельсовой стали и непрерывнолитых заготовок неметаллическими включениями при снижении окисленности стали на выпуске из печи совместно с увеличением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в сталеразливочном ковше.

## **2.4 Выводы по главе 2**

1. На основании комплекса металлографических и рентгенофазовых исследований определено происхождение характерных дефектов рельсов из стали Э76ХФ, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле качества в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Определено, что превалирующей причиной отбраковки рельсов являются расслоения в шейке рельсовых профилей (соответствует центральной зоне исходных непрерывнолитых заготовок) со скоплениями неметаллических включений в виде силикатов алюминия, непластичных оксидов алюминия и кремния, а также сульфидов марганца. Указанные включения вытянуты в направлении прокатки и имеют длину до 2 мм.

2. На основании статистического анализа установлено, что повышение окисленности стали на выпуске из печи в ковш, снижение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь», повышение содержания серы, фосфора, меди и олова в готовой стали оказывают значимое влияние на повышение отбраковки рельсов стали Э76ХФ по внутренним дефектам металлургического происхождения. Металлографическими исследованиями проб жидкой стали рассматриваемой марки после внепечной обработки и проб, отобранных от непрерывнолитых заготовок, подтверждено снижение загрязненности стали неметаллическими включениями при снижении окисленности стали совместно с увеличением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в сталеразливочном ковше.

### **3 Моделирование процессов внепечной обработки рельсовой стали на агрегате «ковш-печь» с целью обоснования эффективных режимов рафинирования расплава**

Важнейшим элементом технологии производства качественной рельсовой стали является использование современных методов внепечной обработки металла при возможности поэтапного выполнения технологических операций в различных агрегатах ковшевой металлургии, что позволяет корректировать полученные на предыдущей стадии результаты без снижения темпа производства. Следует отметить, что объективная потребность в таких агрегатах значительно возросла с развитием современных вариантов электродуговой плавки и это позволило значительно увеличить производительность сталеплавильного производства [109]. В то же время в соответствии с современными представлениями дуговая сталеплавильная печь, как правило, приспособлена только для проведения операции расплавления лома, окислительного обезуглероживания и дефосфорации, причем продуктом плавки является не готовая сталь, а только окисленный полупродукт.

Такой технологический маршрут предопределяет проведение раскисления, легирования и дальнейшего рафинирования расплава непосредственно в сталеразливочном ковше, а технико-экономические показатели процесса при этом в значительной степени будут определяться показателями металлозавалки. Поэтому сталь необходимого химического состава и качества формируется, по существу, в ковше, где расплавленный полупродукт подвергается различной обработке в одном или нескольких специализированных агрегатах, в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при производстве рельсовой стали – это агрегат «ковш-печь» и камерный вакууматор.

Важным представляется отметить, что термодинамические условия проведения раскисления, легирования и рафинирования расплава в специализированных внепечных агрегатах (шлак оптимального состава,

регулируемый состав атмосферы, вакуум) и более благоприятные кинетические условия (интенсивное перемешивание, большая поверхность взаимодействия фаз, возможность введения порошков и присадок в объем расплава), обеспечивают достижение более существенных результатов, чем при аналогичном выполнении таких операций в плавильных печах.

В данном случае применение математического моделирования процессов обработки на агрегате «ковш-печь» позволит получить новую научную информацию, которая явится обоснованием для решения поставленной задачи повышения степени рафинирования расплава от неметаллических включений.

### **3.1 Исследование эффективности перемешивания металла в сталеразливочном ковше при различных режимах продувки инертным газом**

Использование в технологическом цикле производства рельсовой стали металлургического агрегата «ковш-печь» наиболее рационально обеспечивает возможность управления процессами формирования физико-химических свойств расплава для получения высококачественных сталей с заданными характеристиками [110].

Важнейшим составным элементом такой технологии является продувка инертным газом, которая позволяет успешно решать такие технологические задачи, как снижение неоднородности по температуре и химическому составу, удаление неметаллических включений, а также частичной дегазации расплава [111]. При этом на многих агрегатах «ковш-печь» в качестве стандартных режимов используют продувку инертным газом через пористые пробки, установленные в днище ковша [112].

В соответствии с выполненными исследованиями (раздел 2) установлено значительное влияние параметров продувки стали инертным газом в процессе ковшевой обработки в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на вероятность образования дефектов рельсов металлургического происхождения (суммарная относительная степень влияния длительности и интенсивности продувки на отбраковку рельсов

составила 24%). Поскольку продувка инертным газом осуществляется на всем протяжении обработки расплава в агрегате «ковш-печь», то ее продолжительность фактически ограничивается только циклом работы смежных основных агрегатов (плавильного агрегата, вакууматора и МНЛЗ). В качестве ограничений по увеличению интенсивности продувки выступают технические возможности продувочных устройств, увеличение рисков выбросов металла через борт ковша и повышение вероятности затягивания частиц шлака в металл.

Ниже представлены результаты исследований по численному моделированию процессов перемешивания расплава при продувке инертным газом в агрегатах ковш-печь, основное содержание которых отражено в работе [113].

Анализ показателей работы агрегата «ковш-печь» ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показал, что интенсивность продувки инертным газом изменяется в широких пределах – от 10 до 65 м<sup>3</sup>/мин. (при среднем значении – 30 м<sup>3</sup>/мин.) При проведении исследований данный диапазон расширили до интервала 10-85 м<sup>3</sup>/мин.

Для решения задач по оптимизации режимов продувки расплава инертным газом в ковше, как правило, используется физическое моделирование или численные методы исследования движения потоков металла, обеспечивающие его перемешивание, или создают специальные методики, позволяющие оценить развитие высокоинтенсивных конвективных процессов, возникающих при движении металла в процессе его продувки инертным газом.

В условиях обработки металла в ковше при отсутствии перемешивания расплава кислородными струями и всплывающими пузырями монооксида углерода с определенными допущениями можно предположить, что перемешивание осуществляется только (или в основном) за счет продувки инертным газом, а определяющие для оценки перемешивания ванны подходы подчиняются основным законам аэрогидродинамики.

Как известно [114-116], существуют различные методы оценки эффективности перемешивания расплава, при этом интенсивность

перемешивания определяется в основном характеристиками режима подачи инертного газа и соответствующими скоростями возникающих циркуляционных потоков металла в ковше. Обычно в качестве основной характеристики используется так называемое время полного перемешивания ( $\tau_{\text{п}}$ ) или время усреднения химического состава расплава после присадки материала в ковш. Другим подходом в оценке перемешивания является использование в качестве характеристики мощность перемешивания ванны ( $N_{\text{п}}$ ). Причём, исходя из различных теоретических предпосылок и условий эксперимента, определение в различных работах соотношения между указанными величинами в уравнении  $\tau_{\text{п}} \approx AN_{\text{п}}^{-n}$  постоянно уточняется и справедливо для тех массивов экспериментальных данных, на основании которых они получены. Показатель степени  $n$  по многочисленным данным колеблется от 0,23 до 0,89, а значения коэффициента  $A$  изменяется в зависимости от характеристик моделирующих сред, геометрии ванны ковша и колеблется в ещё более широких пределах от 50 до 800 [116-118]. Поэтому наиболее точной характеристикой оценки интенсивности перемешивания расплава в ковше в соответствии с классическими подходами гидродинамики жидкости является использование коэффициента эффективной диффузии ( $D_{\text{е}}$ ), объединяющего все основные виды переноса (вынужденная и свободная конвекция, молекулярная диффузия).

В соответствии с современными представлениями при формировании газовых струй при выходе из погруженных в жидкость сопел различают пузырьковый, переходный и струйный режимы, когда газовые объёмы (пузыри) образуются непосредственно на срезе сопла или в конце некоторого струйного участка. Режим взаимодействия газовой струи с жидкостью и размеры образующихся пузырей слабо зависят от направления подвода дутья [118]. Известно, что выходящая из сопла струя инертного газа встречает некоторое сопротивление среды (металла) и деформируется. Поскольку различные переходные режимы взаимодействия газовых струй с металлом в реальных условиях сложно фиксируются, возможно, использование следующей классификации режимов: режим барботирования (пузырьковый режим), характеризующийся

периодическим растеканием газовых пузырей по площади дна ковша или площади сечения металла с последующим их всплыванием; режим струйного истечения при формировании непрерывной газовой струи на некотором участке проникающем в объём металла в ковше. Реализация того или иного режима при этом всегда связана со скоростью струи на срезе сопла и расходом инертного газа.

Анализ многочисленных данных показывает, что пузырьковый режим истечения может сохраняться до скоростей порядка 20-30 м/с, а при больших скоростях истечения (более 100 м/с для газожидкостных потоков) сохраняются основные закономерности струйных течений [119].

Предварительно с использованием положений волновой теории процессов при продувке расплавов [119] по известным выражениям рассчитывали и определяли параметры всплывающих пузырей инертного газа. В соответствии с данным подходом всплывающие пузыри генерируют вихри аналогичного размера, а в объёме расплава возникает развитая турбулентность, обусловленная, с одной стороны, возникновением направленных циркуляционных потоков, а с другой – турбулентными пульсациями в этих потоках, что обеспечивает случайный статистический характер переноса.

При реализации струйного режима истечения диаметр образующихся пузырей можно рассчитывать по выражению [115]:

$$D = k_D \cdot q^{\frac{2}{5}} \cdot g^{-\frac{1}{5}} \quad (3.1)$$

где  $k_D = 1,19$  [114];  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$q$  – расход газа через донное сопло, м<sup>3</sup>/с.

Для пузырькового режима истечения газовых струй диаметр образующихся газовых пузырей находится с применением критерия Бонда [119]:

$$\frac{D}{d} = \frac{2}{\pi^{\frac{1}{3}} \cdot B_0^{\frac{1}{3}}} \quad (3.2)$$

где  $B_0$  – критерий Бонда;  $d$  – диаметр сопла, м<sup>2</sup>.

Критерий Бонда находится, как:

$$B_0 = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d^2}{V} < \pi^2 \quad (3.3)$$

где  $\Delta\rho$  – разность плотностей жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр сопла, м<sup>2</sup>;

$V$  – поверхностное натяжение расплава, полученное с учетом равенства сил, действующих на газовый пузырь, Н/м.

Принимали, что согласно [119] скорость всплытия газовых пузырей:

$$w_{\text{вспл}} = (g \cdot D)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

При использовании пористых вставок установленных в днище ковша диаметр образующихся пузырей не будет превышать 5-6 мм и практически не зависит от расхода инертного газа, являясь результатом взаимодействия гравитационных и капиллярных волн. Скорость всплывания таких пузырей в объёме ванны ковша находится в пределах 1,5-1,6 м/с и 0,1-1,5 м/с для обоих режимов соответственно. В соответствии с выдвинутой Прандтлем «теорией пути смещения» [114], возможно определение коэффициента микропереноса в жидкости по аналогии с коэффициентом переноса в молекулярно-кинетической теории газов, где:

$$D_\varepsilon = \bar{u} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{3} \quad (3.5)$$

где  $D_\varepsilon$  – коэффициент эффективной диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$\bar{u}$  – средняя скорость молекул газа, м/с;

$\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пробега газа, м.

Для рассматриваемого случая переноса в расплаве:

$$D_\varepsilon = w_p \cdot l \quad (3.6)$$

где  $w_p$  – скорость циркуляции расплава, м/с;

$l$  – масштаб движения (линейный масштаб турбулентных пульсаций), м.

Линейный масштаб турбулентных пульсаций представляет собой линейный размер элементарной площадки, приходящийся на один центр газовыделения (в

рассматриваемом варианте центр газовыделения – это пористая пробка) и находится из выражения:

$$l = \frac{\sqrt{S}}{m} \quad (3.7)$$

где  $S$  – площадь поверхности ванны в спокойном состоянии,  $\text{м}^2$ ;

$m$  – количество донных пористых пробок.

Учитывая тот факт, что расплав циркулирует под действием импульса всплывающих пузырей или газовых струй можно записать:

$$D_\varepsilon = \frac{\sum_{m=1}^m J_i l_i}{Q} \quad (3.8)$$

где  $m$  – количество источников газовыделения (пористых пробок);

$J_i$  – секундный импульс газовых струй, действующих на расплав,  $\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$ ;

$Q$  – масса металла в ковше,  $\text{кг}$ .

Импульс, действующий со стороны одиночного всплывающего пузыря:

$$J_i = P \cdot \tau \quad (3.9)$$

где  $P$  – подъемная сила,  $\text{Н}$ ;  $\tau$  – время действия подъемной силы,  $\text{с}$ .

$$P = Vg(\rho_m - \rho_\Gamma) \approx Vg\rho_m, \text{ так как } \rho_m \gg \rho_\Gamma \quad (3.10)$$

где  $V$  – объём одиночного пузыря,  $\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\rho_m$  и  $\rho_\Gamma$  – плотности металла и газа соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

$$\tau = \frac{h_B}{\omega_{\text{вспл}}} \quad (3.11)$$

где  $h_B$  – высота металла в ковше,  $\text{м}$ ;  $\omega_{\text{вспл}}$  – скорость всплывания пузыря,  $\text{м}/\text{с}$ .

Для получения значения суммарного импульса всех всплывающих пузырей, образующихся на поверхности пористой пробки, можно вместо величины  $V$  использовать объёмный расход инертного перемешивающего газа ( $V_\Gamma$ ):

$$\sum_{m=2}^m J_i = \frac{\rho_m g V_\Gamma l}{\omega_{\text{вспл}}} \quad (3.12)$$

где  $\rho_m$  – плотность металла,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$V_\Gamma$  – объёмный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $h_B$  – высота металла в ковше,  $\text{м}$ ;

$\omega_{\text{вспл}}$  – скорость всплывания пузыря,  $\text{м}/\text{с}$ .

$$V_{\Gamma} = \frac{G}{\rho_{\Gamma}} \quad (3.13)$$

где  $G$  – массовый расход газа, кг/с;  $\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

$$G = f_{\Gamma} \omega_{\text{вспл}} \rho_{\Gamma} \quad (3.14)$$

где  $f_{\Gamma}$  – площадь выходного сечения, м<sup>2</sup>;  $\omega_{\text{вспл}}$  – скорость всплывания пузыря, м/с.

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

Тогда в соответствии с принятой моделью:

$$D_{\varepsilon} = \frac{\rho_{\text{м}} \cdot g \cdot V_{\Gamma} \cdot h_{\text{в}} \cdot \frac{\sqrt{S}}{m}}{w_{\text{вспл}} \cdot Q} \quad (3.15)$$

где  $\rho_{\text{м}}$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V_{\Gamma}$  – объемный расход инертного газа, м<sup>3</sup>/с;  $h_{\text{в}}$  – высота металла в ковше, м;

$S$  – площадь поверхности ванны в спокойном состоянии, м<sup>2</sup>;

$m$  – количество донных пористых пробок;

$w_{\text{вспл}}$  – скорость всплытия газовых пузырей, м/с;

$Q$  – масса металла в ковше, кг.

Мощность перемешивания определяли, опираясь на использование законов сохранения энергии и количества движения:

$$N_{\Pi} = \sum_{m=2}^m J_i l_i, \quad (3.16)$$

где  $J_i$  – секундный импульс газовых струй, действующих на расплав, кг·м/с;

$l_i$  – «масштаб движения» (или характерный размер), равный 1/3 размера всплывающих пузырей, м.

Результаты моделирования [113] свидетельствуют, что при повышении интенсивности продувки происходит линейное увеличение мощности перемешивания вне зависимости от режима истечения газовых струй (рисунок 3.1).

Однако при этом для струйного режима истечения характерны абсолютные значения мощности перемешивания, которые значительно превышают данный

показатель для пузырькового режима (различие составляет 3,6-4,0 раза при аналогичных значениях интенсивности продувки) и наблюдается значительно более интенсивный рост мощности перемешивания с увеличением интенсивности продувки (рисунок 3.1).

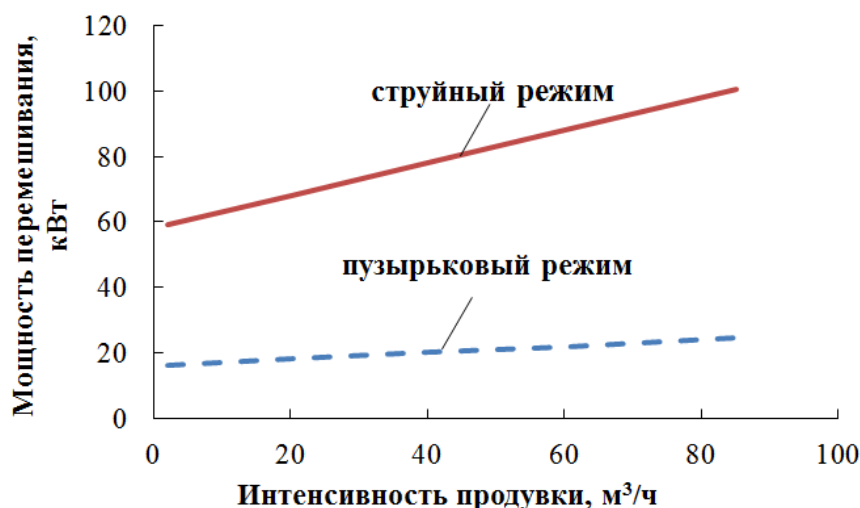


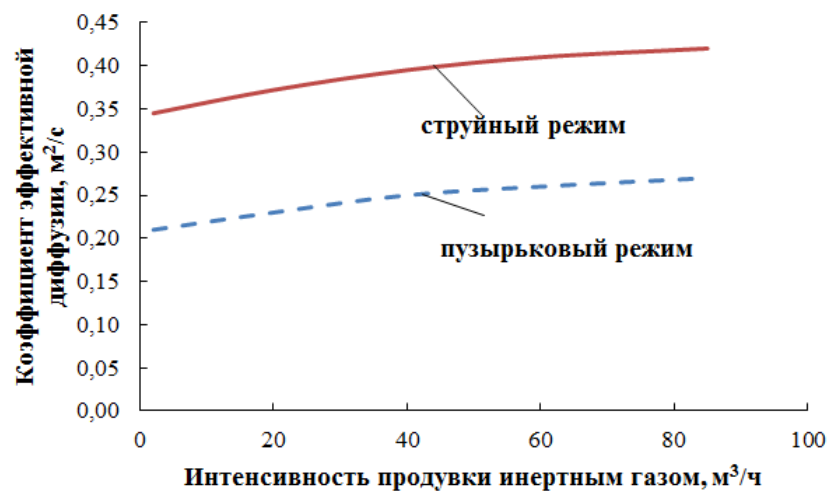
Рисунок 3.1 – Зависимость интенсивности перемешивания расплава в сталковше ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» от интенсивности продувки инертным газом

Как показывают расчеты в случае незначительной скорости всплывания пузырьков уменьшение их диаметра пузырьков обуславливает увеличение продолжительности пребывания в расплаве, повышает площадь их суммарной поверхности, что в совокупности способствует достижению более стабильной дегазации, приближению системы металл-шлак к равновесному состоянию и интенсификации процесса всплытия неметаллических включений.

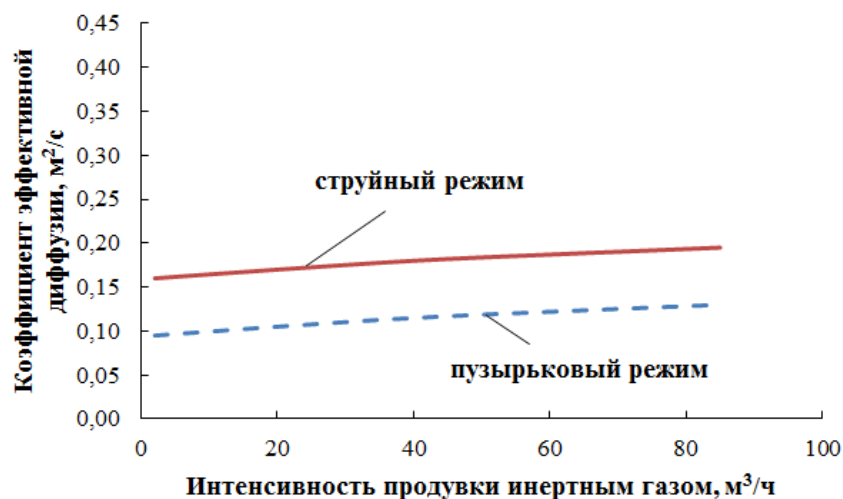
Согласно имеющимся представлениям перенос вещества в результате диффузии может быть разложен на три составляющие: вертикальная, горизонтальная и радиальная [117]. С учетом этого факта для определения значения коэффициента диффузии в направлениях переноса применяли критериальные зависимости, характеризующие перемешивание расплава для условий эксперимента.

Результаты проведенного моделирования [113] свидетельствуют, что в рассматриваемом диапазоне изменения интенсивности продувки инертным газом ее увеличение обуславливает рост коэффициента эффективной диффузии по нелинейному закону во всех рассматриваемых направлениях переноса и вне

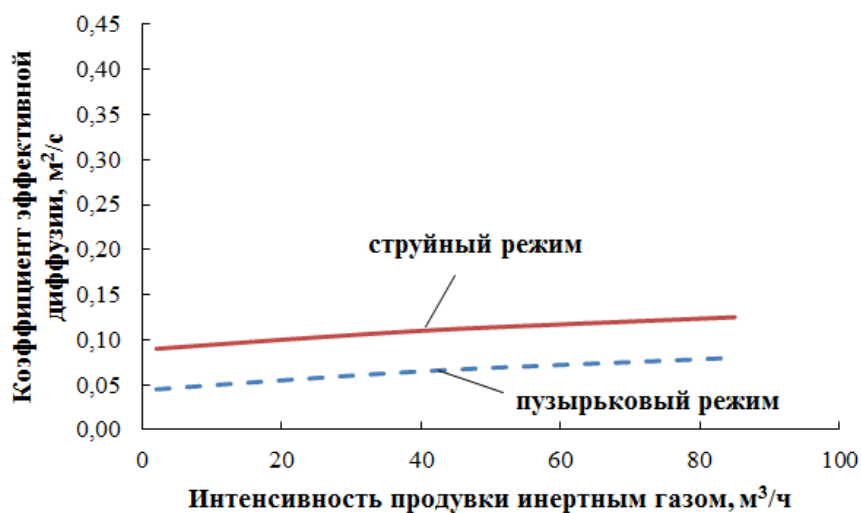
зависимости от режима продувки (рисунок 3.2).



а



б



в

Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента эффективной диффузии от интенсивности продувки инертным газом в стальковше ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для случая вертикального (а), горизонтального (б) и радиального (в) переноса

При этом наибольшие абсолютные значения коэффициента диффузии имеют место для случая вертикального переноса (рисунок 3.2 а), а наименьшие – для радиального (3.2 в).

Проводя сравнительный анализ коэффициентов эффективной диффузии при различном направлении переноса и одинаковой интенсивности продувки можно констатировать, что указанный коэффициент для случая вертикального переноса превышает данный показатель при радиальном переносе в 3,4-4,7 раз, а отношение коэффициентов диффузии для случаев вертикального и горизонтального переноса составляет в среднем 2,2 раза.

Также установлено, что при струйном режиме истечения газовых струй диффузия проходит в 1,5-2,0 раза эффективнее по сравнению с пузырьковым режимом.

### **3.2 Численные исследования параметров теплообмена при инжекционной подаче порошков в расплав рельсовой стали на агрегате «ковш-печь»**

Для разработки основных положений обработки рельсовой стали на агрегате «ковш-печь» необходимо получение информации по особенностям технологии вдувания порошкообразных реагентов в расплав через погружную фурму [120-124]. Анализ имеющихся данных показывает, что с целью обеспечения эффективной десульфурации металла при обработке на агрегатах «ковш-печь», как правило, используется обработка синтетическими шлаками, твёрдыми шлакообразующими смесями либо технология вдувания порошкообразных реагентов в расплав через погружную фурму [125-128].

Данный раздел посвящен численному моделированию процессов обработки расплава рельсовой стали порошковыми материалами путем их вдувания через погружную фурму; основные результаты указанного исследования содержатся в работе [129].

Необходимо отметить, что наличие при продувке выраженной барботажной зоны, значительно осложняет условия эксплуатации оборудования, уменьшает стойкость погружных фурм и футеровки ковша. Поэтому получение новых данных по определению характеристик течения, параметров теплового потока через условно разделительную стенку погружной фурмы от расплава к двухфазной газопорошковой струе может привести к значительным погрешностям при оценке импульса и мощности газопорошкового потока, внедряющегося в расплав.

В данных условиях с учетом необходимости решения сложных технологических задач достаточно часто используются методы исследования с применением динамических или статических моделей [130-134], причём при рассмотрении таких задач газопорошкового течения при движении взаимопроникающих сред указанные методы существенно дополняют друг друга [135-138].

Согласно имеющимся данным при нагреве транспортирующего порошок инертного газа в погружной фурме до температуры порядка 300-400°C тепловая мощность такого газопорошкового потока, истекающего в 100-тонный сталеразливочный ковш увеличится более чем в 2 раза и превысит 2 МВт, а динамическая энергия такого потока возрастает в 1,5-2 раза [133].

При проведении исследований с использованием численных методов проведено моделирование влияния температуры поверхности погружной фурмы на тепловой поток, передаваемый транспортирующему газу с учетом изменения концентрации порошка и его плотности, а также влияние температуры несущего газа на основные характеристики газопорошкового течения (коэффициент аэродинамического сопротивления, давление транспортирующего газа, разность скоростей фаз, эквивалентный диаметр и коэффициент формы частиц) [129].

Решение системы уравнений движения и теплообмена в погружной фурме проводили с учетом их дополнения замыкающими алгебраическими соотношениями и принятия следующих допущений:

- движение является квазистационарным и одномерным;

- двухфазный поток принимается монодисперсным;
- скорость и температура фаз являются переменными величинами;
- тепловое взаимодействие твердых частиц со стенкой фурмы не учитывается;
- теплоотдача от стенки к несущему газу осуществляется только конвекцией.

С учетом вышесказанного модель, по сути, включала два этапа: газодинамический и теплообменный в дисперсной среде. Основные положения газодинамического этапа приняты исходя из данных работы [131].

Тепловой этап модели включает в себя дифференциальные уравнения энергии. Для случая совместного движения транспортирующего газа и монодисперсной примеси уравнение для расчета теплоты, передаваемой конвекцией от стенки фурмы к транспортирующему газу примет вид:

$$Q_{1w} = G_1 \frac{d}{dx} \left( c_{p1} T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + G_2 \frac{d}{dx} \left( c_2 T_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) - F_{12} (w_1 - w_2), \quad (3.17)$$

где  $Q_{1w}$  – теплота, передаваемая конвекцией от стенки фурмы к транспортирующему газу, Вт/м<sup>3</sup>;

$G_1$  и  $G_2$  – приведенные расход транспортирующего газа и твердой фазы соответственно, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$c_{p1}$  и  $c_2$  – теплоемкости транспортирующего газа и твердых частиц порошка соответственно, кДж/(кг·К);

$T_1$  и  $T_2$  – температура транспортирующего газа и порошка соответственно, К;

$w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно, м/с.

$$G_1 = m_1 / f' \quad (3.18)$$

$$G_2 = m_2 / f' \quad (3.19)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массовый расход транспортирующего газа и порошка, кг/с;

$f'$  – площадь поперечного сечения погружной фурмы, м<sup>2</sup>.

В рамках модели дополнительно применены уравнения неразрывности для каждой из фаз:

$$\frac{d}{dx}(\varepsilon_1 \rho_1 w_1) = 0; \quad (3.20)$$

$$\rho_2 \frac{d}{dx}(\varepsilon_2 w_2) = 0, \quad (3.21)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – местная объемная концентрация газа и порошка соответственно;

$\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность транспортирующего газа и частиц потока соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно, м/с.

Силу межфазного взаимодействия можно определить, как:

$$F_{12} = F_c n_2, \quad (3.22)$$

где  $F_c$  – сила сопротивления;  $n_2$  – счетная концентрация, 1/м<sup>3</sup>.

$$F_c = C_D S \rho_1 (w_1 - w_2) |w_1 - w_2| / 2, \quad (3.23)$$

где  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$S$  – эквивалентная площадь сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$\rho_1$  – плотность транспортирующего газа, кг/м<sup>3</sup>;

$w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно, м/с.

$$n_2 = 6\varepsilon_2 / (\pi\sigma^3), \quad (3.24)$$

где  $\varepsilon_2$  – местная объемная концентрация порошка;

$\sigma$  – эквивалентный диаметр частицы, м.

$$C_D = f(\text{Re}_{12}), \quad (3.25)$$

где  $\text{Re}_{1-2}$  – число Рейнольдса для двухскоростного течения.

$$\text{Re}_{12} = |w_1 - w_2| \sigma / \nu. \quad (3.26)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно, м/с;

$\sigma$  – эквивалентный диаметр частицы, м;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Так как  $\text{Re}_{12} \gg 1$ , то для «нестоксовской» области сопротивления коэффициент  $C_D$  рассчитывали по аналогии с работой [139] из соотношения:

$$C_D = \frac{24}{Re_{12}} k_\varepsilon (1,25 + 0,01926 k_f Re_{12}),$$

$$1 < Re_{12} < 2 \cdot 10^5, \quad (3.27)$$

где  $k_f$  – поправочный коэффициент;

$k_\varepsilon$  – коэффициент стеснения.

$$k_f = 12,4 + 11,4/f, \quad (3.28)$$

где  $f$  – коэффициент формы частиц.

$$f = S/S_{\text{шара}}, \quad (3.29)$$

где  $S$  – площадь сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{шара}}$  – площадь сечения частицы шаровидной формы.

$$k_\varepsilon = \varepsilon_1^{-2n} \quad (3.30)$$

где  $\varepsilon_1$  – местная объемная концентрация газа;

$n = 2,5 \div 4,0$  – коэффициент структуры потока.

При совместном решении уравнений неразрывности для каждой из двух фаз ( $m_1 = \varepsilon_1 \rho_1 w_1 S$  и  $m_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2 S$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – массовый расход транспортирующего газа и порошка соответственно,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – местная объемная концентрация газа и порошка соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность транспортирующего газа и частиц потока соответственно;  $w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно,  $S$  – площадь сечения частицы) получили, что важнейшие параметры газопорошкового потока и массовая концентрация связаны соотношением:

$$\varepsilon_1 = \left(1 + \frac{\mu \rho_1}{\Psi \rho_2}\right)^{-1}, \quad (3.31)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность транспортирующего газа и частиц потока соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – массовая концентрация порошка, кг/кг;

$\Psi$  – коэффициент динамического скольжения фаз.

$$\mu = m_2/m_1, \quad (3.32)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массовый расход транспортирующего газа и порошка, кг/с;

$$\Psi = w_2/w_1, \quad (3.33)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – скорость транспортирующего газа и частиц порошка соответственно, м/с.

В случае появления по пути движения газопорошкового потока горизонтальных участков устойчивость режима течения нуждается в проверке путем сравнения разности скоростей  $\Delta w$  со скоростью витания  $w_v$ . В погружной фурме с учетом соблюдения условия  $\rho_2 \gg \rho_1$  с достаточной степенью достоверности скорость витания рассчитывается по формуле:

$$w_v = 1,15 \left( \frac{\rho_2 R T_1}{P_1 C_D} \right)^{0,5}, \quad (3.34)$$

где  $\rho_2$  – плотность частиц потока, кг/м<sup>3</sup>;

$P_1$  – давление транспортирующего газа, Па;

$C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $S$  – эквивалентная площадь сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$T_1$  – температура транспортирующего газа, °С;

$R$  – универсальная газовая постоянная.

При этом следует учитывать, что нахождение порошкообразных частиц во взвешенном состоянии имеет место при выполнении условия  $\Delta w > w_v$ .

С учетом того факта, что при изменении температуры транспортирующего газа влияние его плотности и вязкости на величину межфазного взаимодействия противоположно систему уравнений решали численно.

Интенсивность теплообмена газового потока со стенкой фурмы рассчитывали по уравнению Ньютона, исходя из которого теплота, передаваемая конвекцией от стенки фурмы к транспортирующему газу определяется, как:

$$Q_{1w} = \frac{4a_{1w}(T_w - T_1)}{D}. \quad (3.35)$$

где  $a_{1w}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к газу, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_w$  – температура стенки трубы фурмы, К;

$T_1$  – температура транспортирующего газа, К;

$D$  – внутренний диаметр фурмы, м.

С использованием аналитического решения нестационарного уравнения Фурье для защитной футеровки погружной фурмы в каждом конкретном сечении, температуру металлической стенки фурмы рассчитывали по выражению, которое является решением уравнения теплопроводности для цилиндра бесконечной длины [140]; безразмерная температура поверхности трубы определялась, как:

$$\Delta \bar{t} = \frac{T_w - T^{(0)}}{T^1 - T^{(0)}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2J^{(0)}[\beta_i \delta_{\phi} / (0,5D_{\phi})]}{\beta_i J^{(1)}(\beta_i)} \exp(-\beta_i^2 \cdot Fo); \quad (3.36)$$

где  $T^{(0)}$  и  $T^{(1)}$  – начальная температура и температура разогрева, K;

$J^{(0)}$  и  $J^{(1)}$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;

$\beta_i = \beta_i(Bi)$  – корни характеристического уравнения;

$Bi$  и  $Fo$  – числа Био и Фурье соответственно (при  $Bi > 100$  корни характеристического уравнения составляют  $\beta_1 = 2,4048$ ,  $\beta_2 = 5,5201$ ,  $\beta_3 = 8,6537$ ,  $\beta_4 = 11,7915$ ,  $\beta_5 \approx \beta_4 + \pi$ ,  $\beta_6 \approx \beta_5 + \pi$  и т.д.);

$\sigma_{\phi}$  и  $D_{\phi}$  – толщина и диаметр установленной на погружной фурме огнеупорной катушки соответственно, м.

Используя данные работы [139] коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки фурмы к транспортирующему газу рассчитывали:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1w} &= \frac{\lambda_1 Nu_{1w}}{D}; \\ \alpha_{1w} &= \mu^{-0,3} 0,022 [Re_{1w} (1 + \mu)]^{0,8} Pr_{1w}^{0,4} \left( \frac{T_w}{T_1} \right)^{0,5}; \\ \mu &= \frac{m_2}{m_1}; \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);

$Nu_{1w}$ ,  $Re_{1w}$  и  $Pr_{1w}$  – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля для трубы фурмы соответственно;

$\eta$  – коэффициенты динамической вязкости, Па·с.

$$Re_{1w} = \frac{w_1 D \rho_1}{\eta_{1w}}, \quad (3.38)$$

где  $w_1$  – скорость транспортирующего газа, м/с;

$\rho_1$  – плотность транспортирующего газа, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – внутренний диаметр фурмы, м.

С учетом необходимости учета изменения теплофизических свойств транспортирующего газа при изменении температуры и давления вязкость, теплопроводность и теплоемкость аппроксимировали соответствующими уравнениями. Коэффициенты теплопроводности ( $\lambda_1$ ), вязкости ( $\eta_1$ ) и теплоемкости ( $C_{p1}$ ) для каждого компонента транспортирующего газа находили с учетом их нелинейной зависимости от температуры:

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= B_{\eta_1} \Omega \sqrt{T_1}; \\ \lambda_1 &= \frac{B_{\lambda_1} \beta_1 \sqrt{T_1}}{\Omega}, \end{aligned} \right\} \quad (3.39)$$

где  $B_{\eta_1}$  – вириальный коэффициент вязкости,  $\text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0.5}$ ;

$B_{\lambda_1}$  – вириальный коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1.5}$ ;

$T_1$  – температура транспортирующего газа, К;

$\Omega$  – поправочный коэффициент.

Принимали, что молекулы газа взаимодействуют согласно потенциалу Леннарда-Джонса.

Применительно к аргону вириальные коэффициенты вязкости и теплопроводности составили:  $B_{\eta_{\text{Ar}}} = 1,497 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0.5}$ ,  $B_{\lambda_{\text{Ar}}} = 1,166 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1.5}$ ; силовая постоянная  $\varepsilon/k = 118,8398 \text{ К}$  (где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана).

Для азота вышеприведенные величины составили:  $B_{\eta_{\text{N}}} = 1,065 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-0.5}$ ,  $B_{\lambda_{\text{N}}} = 1,178 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1.5}$ ;  $\varepsilon/k = 95,9266 \text{ К}$ .

Температурный коэффициент, учитывающий перенос энергии для аргона, равен 1, а для азота данный коэффициент определяется согласно данным работ [135, 139, 140] в виде степенного ряда по  $T/1000$ .

Поправочный коэффициент  $\Omega$  для газа находится из выражения:

$$\Omega = 1,16145(T^*)^{-0,14874} + 0,52487 \exp(-0,7732T^*) + 2,16178 \exp(-2,49787T^*), \quad (3.38)$$

где  $T^*$  – приведенная температура (например, при  $20^\circ \text{C}$  для аргона  $T^* = kT/\varepsilon = 288,15/118,8398 = 2,425$ ).

В выражениях, представленных выше, кинематическая вязкость  $\nu$  и температуропроводность  $a$  транспортирующего газа связаны соотношениями:  $\nu_1 = \eta_1/\rho_1$  и  $Pr = \nu_1/a_1$ .

Для аргона принимали  $c_{p_{Ar}} = 521$  Дж/(кг·К), а для азота нелинейную теплоемкость рассчитывали по выражению  $c_{p_N} = 965 + 0,2112T - 12,067 \cdot 10^{-6}T^2$ .

Для решения уравнений движения и полной энергии системы использовали численный конечно-разностный метод. При этом разностную аппроксимацию дифференциальных уравнений проводили на равномерной сетке вдоль оси с шагом  $\Delta x$ ; использовали неявную схему с итерациями.

При моделировании инжекционной продувки расплава в сталеразливочном ковше ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» расход транспортирующего газа принимали в диапазоне  $V_1 = 60 \div 80$  м<sup>3</sup>/ч; размер частиц изменяли в пределах  $\sigma_2 = 0,1 + 0,5$  мм, их плотность – в интервале  $\rho_2 = 2000 \div 3500$  кг/м<sup>3</sup>, а концентрацию порошка – от  $\mu = 0$  (чистый газ) до  $\mu = 60$  кг/кг (загруженный дисперсный поток).

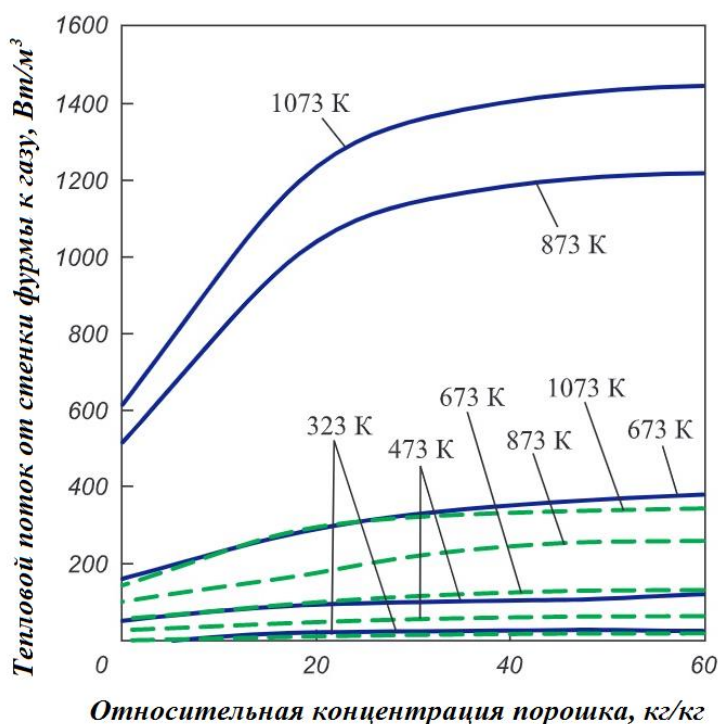
Для указанных условий продувки расход порошка изменялся в пределах  $m_2 = 0 \div 140$  кг/мин (газ аргон). Принимали изменение температуры стенки фурмы, в пределах  $T_w = 323 + 1073$  К; при этом различные значения указанной температуры получали за счет изменения толщины защитной футеровки фурмы. Теплопроводность футеровки фурмы принимали равной 0,7 Вт/(м·К).

По полученным в результате численного моделирования данным [129] количество теплоты, передаваемой стенкой фурмы транспортирующему газу, при аналогичной температуре газа значительно выше в случае использования аргона по сравнению с азотом (рисунок 3.3), что обусловлено различием значений коэффициента теплоотдачи. Так при температуре 323К отношение  $\lambda_{N_2}/\lambda_{Ar} = 1,58$ , а при температуре 1073К –  $\lambda_{N_2}/\lambda_{Ar} = 4,25$ .

Кроме того, при одних и тех же значениях относительной концентрации порошка и расходе несущего газа аргон переносит примерно в 1,5 раза больше порошка, чем азот (так как  $\rho_{н.Ar}/\rho_{н.N_2} \approx 1,5$ ). По этой причине скорость азота выше по сравнению с аргоном, в результате чего для азота выше значения числа

Нуссельта и теплопроводности. В результате, например, при относительной концентрации порошка  $\mu = 40$  кг/кг и увеличении температуры стенки фурмы  $u$  с 323К до 1073К значение теплового потока для аргона возрастает в 4,5 раза (рисунок 3.3).

С увеличением плотности частиц потока практически пропорционально снижается объемная концентрация порошка. Так при увеличении плотности порошка в 1,7 раза (с 2000 до 3000 кг/м<sup>3</sup>) объем дисперсных частиц в потоке уменьшается в 1,66 раз (с 0,07 до 0,04). Как видно из уравнения неразрывности для твердой фазы ( $m_2 = \varepsilon_2 \rho_2 w_2 f$ ), при  $f = \text{const}$ , снижение плотности порошка  $\varepsilon_2$  приводит к увеличению скорости дисперсной среды  $w_2$ . В результате происходит уменьшение разности скоростей  $\Delta w = w_1 - w_2$  и, соответственно, снижаются числа Рейнольдса и Нуссельта, а также коэффициент теплоотдачи. По указанной причине тепловой поток, передаваемый конвекцией от стенки футеровки к транспортирующему газу, также снижается и, при этом, чем ниже значения относительной концентрации порошка, тем влияние объема дисперсных частиц на тепловой поток будет меньше.



— транспортирующий газ аргон — — — — — транспортирующий газ азот  
 Рисунок 3.3 – Зависимость теплового потока от концентрации порошка в газовзвеси при различной температуре газа (толщина стенки фурмы 3 мм)

Установлено, что при нагреве транспортирующего газа сила межфазного взаимодействия снижается вне зависимости от относительной концентрации порошка (рисунок 3.4). Так при нагреве азота со 100°С до 600°С и относительной концентрации порошка  $\mu=80$  кг/кг сила межфазного взаимодействия снижается с 1,75 до 0,35 МН/м<sup>3</sup>. При этом для тех же условий вследствие уменьшения плотности транспортирующего газа объемная доля газовой фазы возрастает с 0,72 до 0,86. Данный факт объясняется тем, что при нагреве азота его плотность и коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшаются. При увеличении интенсивности нагрева с повышением относительной концентрации порошка прирост силы межфазного взаимодействия в потоке менее плотного газа снижается. Так при относительной концентрации порошка  $\mu = 120$  кг/кг и повышении температуры со 100°С до 600°С прирост составляет 3,75 раза (рисунок 3.4).

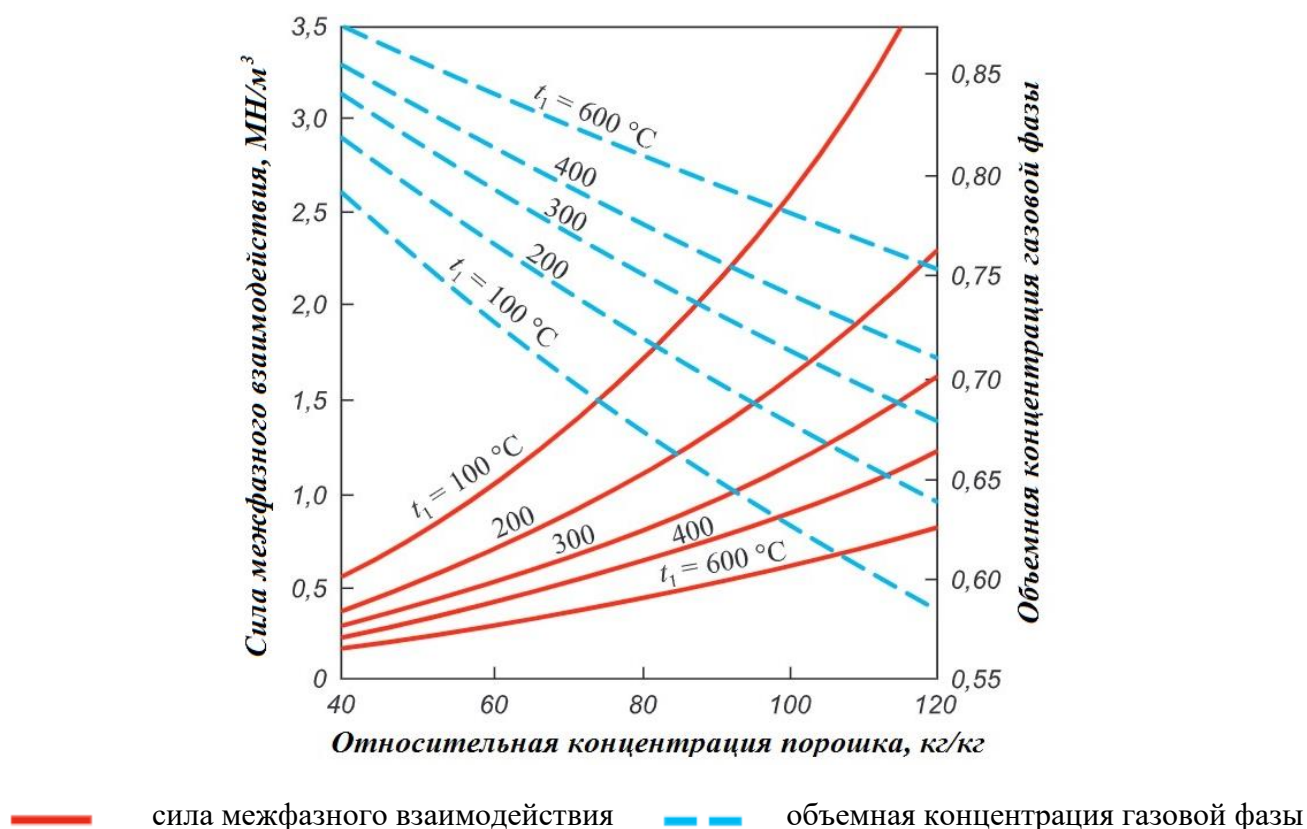
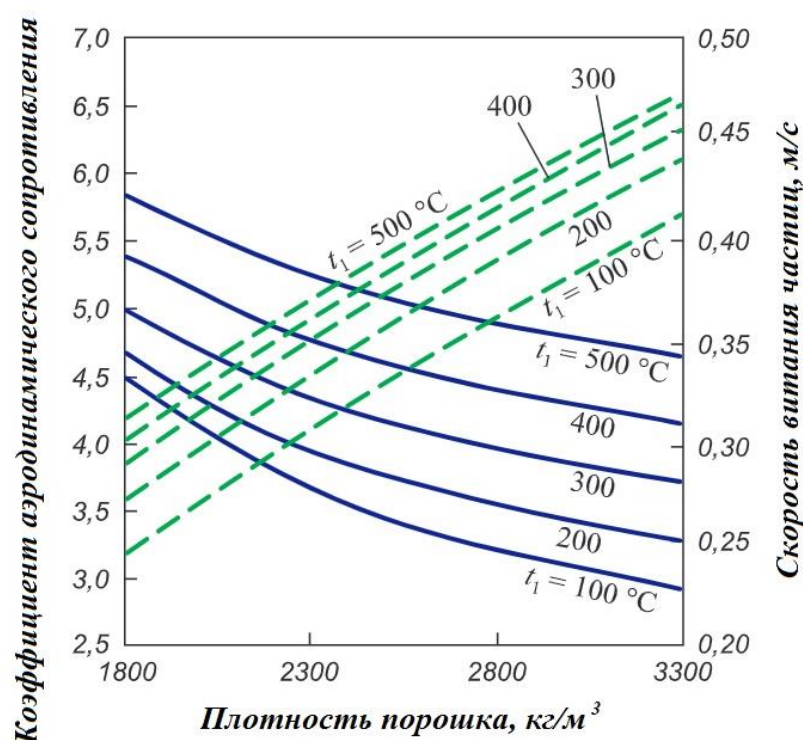


Рисунок 3.4 – Зависимость силы межфазного взаимодействия и объемной концентрации газовой фазы от концентрации порошка в газозвеси при различной температуре газа

Согласно полученных данных при одинаковом значении температуры газа с увеличением плотности порошка коэффициент аэродинамического сопротивления снижается. При этом само увеличение температуры газа способствует повышению указанного коэффициента. Так при плотности порошка  $\rho_2 = 2800 \text{ кг/м}^3$  увеличение температуры газа со  $100^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$  приводит к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления с 3,2 до 4,9; при этом скорость витания частиц увеличивается с 0,36 до 0,44 м/с (рисунок 3.5).

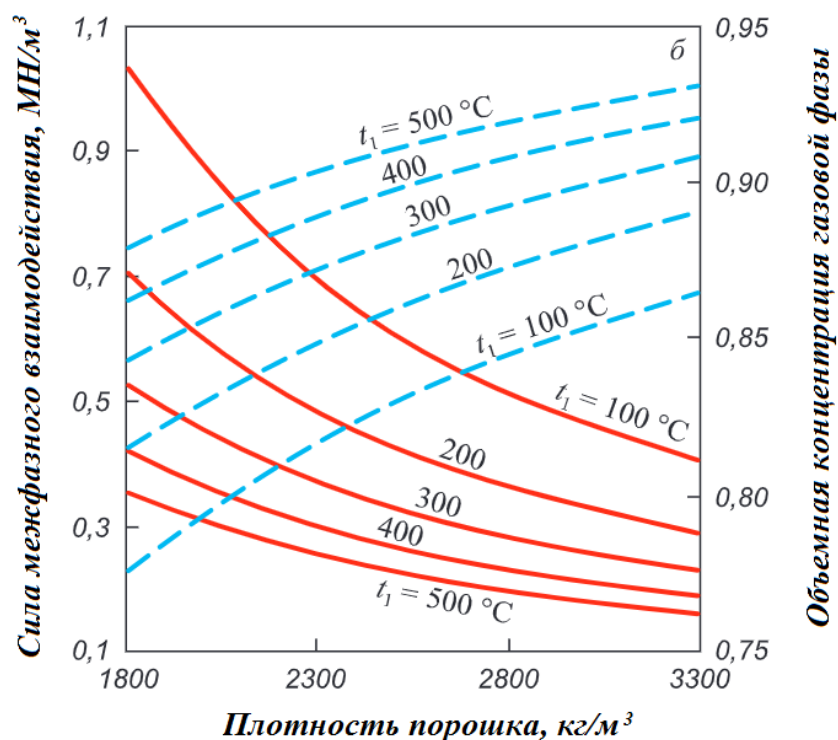


— коэффициент аэродинамического сопротивления      - - - скорость витания

Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента динамического сопротивления и скорости витания частиц от плотности порошка при различной температуре газа

Сила взаимодействия между фазами при тех же условиях (плотности порошка  $\rho_2 = 2800 \text{ кг/м}^3$  и увеличении температуры со  $100^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$ ) снижается с 0,52 до  $0,20 \text{ МН/м}^3$ , а объемная концентрация газа увеличивается с 0,84 до 0,92 (рисунок 3.6). Приведенная закономерность обусловлена менее существенным снижением коэффициента аэродинамического сопротивления при нагреве газа по сравнению с одновременным снижением плотности газа и объемной

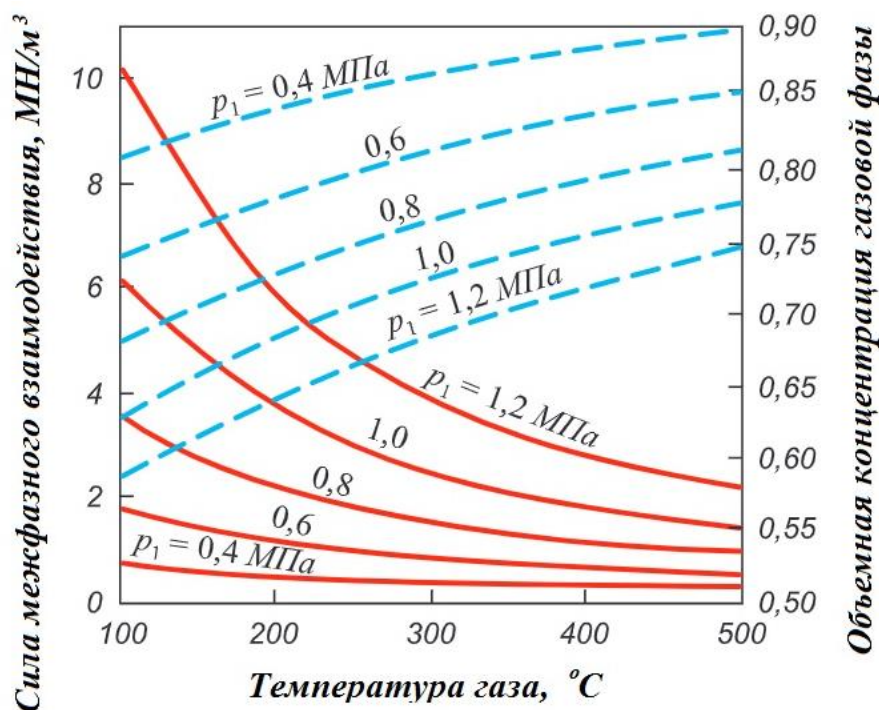
концентрации порошка.



— сила межфазного взаимодействия      - - - - - объемная концентрация газовой фазы

Рисунок 3.6 – Зависимость силы межфазного взаимодействия и объемной концентрации газовой фазы от плотности порошка при различной температуре газа

Анализ изменения силы межфазного взаимодействия при определенной температуре и увеличении давления газа позволяет сделать вывод, что при более низких температурах прирост давления газа сильнее увеличивает значение указанной силы (рисунок 3.7). Так, например, при температуре азота 100 °C прирост давления с 0,4 до 1,2 МПа увеличивает силу межфазного взаимодействия с 0,80 до 10,1 МН/м³. Если же температура газа составит 500 °C, то при аналогичном увеличении давления газа сила межфазного взаимодействия уменьшится с 2,1 до 0,21 МН/м³. Указанная закономерность обусловлена зависимостью силы межфазного взаимодействия от вязкости газа  $\nu = f(t, \rho)$ . Так при температуре газа 100 °C и увеличении давления газа с 0,4 до 1,2 МПа значение кинематической вязкости будет снижаться с  $5,84 \cdot 10^{-6}$  до  $1,95 \cdot 10^{-6}$  м³/с.

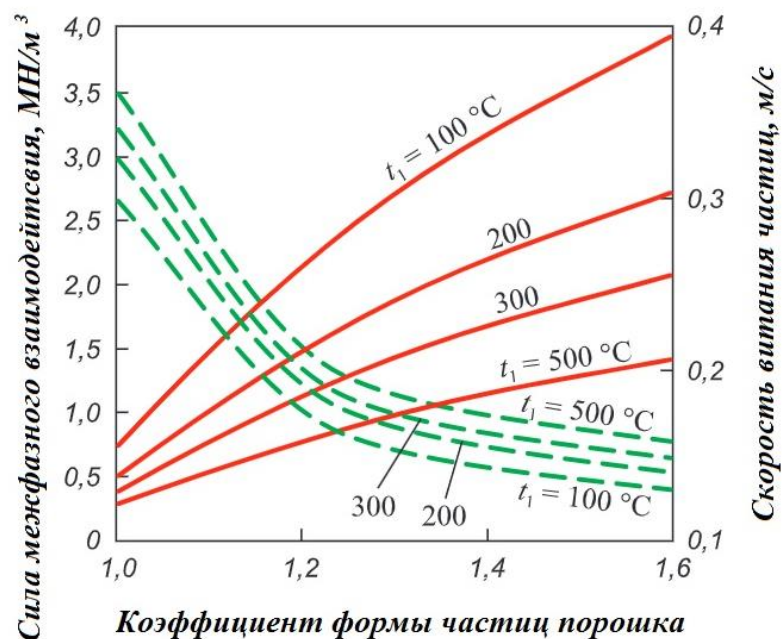


— сила межфазного взаимодействия      — объемная концентрация газовой фазы

Рисунок 3.7 – Зависимость силы межфазного взаимодействия и объемной концентрации газовой фазы от температуры газа при различном его давлении

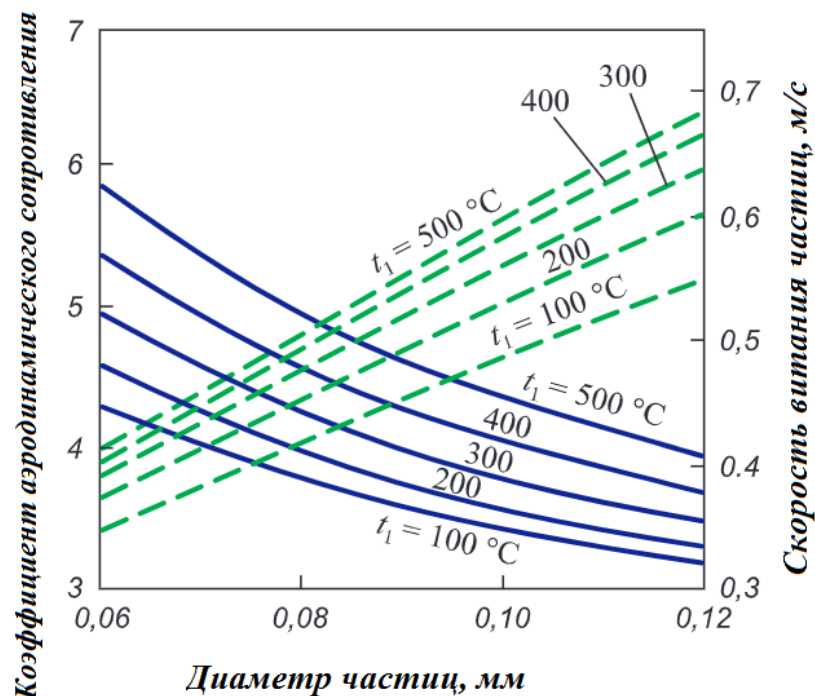
Результаты моделирования свидетельствуют, что чем значительней форма частиц отличается от сферической, тем больше сила межфазного взаимодействия и, при этом, ниже скорость витания частиц (рисунок 3.8). Так при температуре газа  $100^{\circ}\text{C}$  повышение коэффициента формы с 1,0 (шар) до 1,6 (пластина) приводит к увеличению силы межфазного натяжения в 5 раз (с 0,75 до  $3,77\text{ МН/м}^3$ ). Установлено, что нагрев транспортирующего газа в рассматриваемых условиях всегда снижает межфазное сопротивление. Например, для частиц с коэффициентом формы равным  $f = 1,6$  увеличение температуры газа со  $100^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению силы межфазного взаимодействия в 2,7 раза (с  $3,77$  до  $1,40\text{ МН/м}^3$ ).

По полученным данным с увеличением диаметра частиц коэффициент аэродинамического сопротивления снижается для всех рассматриваемых значений температур газа (рисунок 3.9).



— сила межфазного взаимодействия      - - - скорость витания

Рисунок 3.8 – Зависимость силы межфазного взаимодействия и объемной концентрации газовой фазы от коэффициента формы частиц порошка при различной температуре газа



— коэффициент аэродинамического сопротивления      - - - скорость витания

Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента динамического сопротивления и скорости витания от диаметра частиц порошка при различной температуре газа

Однако при этом увеличение температуры способствует увеличению значений коэффициента аэродинамического сопротивления, а снижение размера частиц обуславливает меньший прирост указанного коэффициента при увеличении температуры газа. Так, например, для частиц диаметром 0,06 мм при росте температуры газа в интервале 100-500°С коэффициент аэродинамического сопротивления возрастает в 7,6 раза, а для частиц диаметром 0,12 мм увеличение температур в таком же интервале обуславливает повышение коэффициента аэродинамического сопротивления только в 1,36 раза. Также видно, что скорость витания частиц порошка в большей степени зависит от размера частиц порошка, а не от температуры газа.

Следует отметить, что проведение экспериментальных исследований в производственных условиях (в условиях газопорошковой продувки в реальном сталеразливочном ковше) с целью подтверждения адекватности вышеприведенной модели практически неосуществимо. Поэтому проверку адекватности модели провели с использованием метода тестирования:

- если относительная концентрация порошка  $\mu \rightarrow 0$  (чистый газ), то масса газовзвеси уменьшается в десятки раз, от стенки фурмы меньше отводится теплоты и значение  $Q_{1w}$  существенно снижается;

- если относительная концентрация порошка  $\mu$  снижается, при этом влияние плотности частиц  $\rho_2$  на значение  $Q_{1w}$  проявляется меньше, а в чистом газе ( $\mu = 0$ ) такое влияние вообще отсутствует;

- если относительная концентрация порошка  $\mu \rightarrow 0$ , массовый расход порошка  $m_2 \rightarrow 0$  и сила межфазного взаимодействия  $F_{12} \rightarrow 0$ , то объемная концентрация газовой фазы  $\varepsilon_1 \rightarrow 1$  (рисунок 3.4);

- если плотность частиц  $\rho_2$  частиц растет, то увеличивается объемная концентрация газовой фазы  $\varepsilon_1$  (рисунок 3.6);

- если давление транспортирующего газа  $p_1$  и плотность газа в погружной фурме ( $\rho_1$ ) возрастают, то увеличиваются объемная концентрация порошка  $\varepsilon_2$  и сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$  при любом значении температуры газа  $t_1$  (рисунок 3.7);

– если форма частиц ближе к шару (коэффициент формы частиц  $f \rightarrow 1$ ), то поправочный коэффициент  $k_f \rightarrow 1$  и сила межфазного взаимодействия  $F_{12} \rightarrow F_{12\min}$  при любой температуре (рисунок 3.8);

– если увеличивается диаметр частиц ( $\sigma$ ), то при таком же расходе порошка  $m_2$  их количество и площадь поверхности трения, а поэтому и сила межфазного взаимодействия  $F_{12}$  снижаются, а скорость витания частиц  $w_v$  возрастает (рисунок 3.9).

Таким образом, тестовый анализ показал, что полученные результаты соответствуют современным физическим представлениям по течению дисперсных потоков в погружных фурмах.

Обобщая вышеприведенные результаты численного моделирования процессов газопорошковой продувки можно констатировать, что на количество теплоты, передаваемой от стенки фурмы к транспортирующему газу (тепловой поток), оказывают влияние в порядке убывания физического воздействия такие параметры как: температура стенки фурмы, концентрация порошка, плотность порошка. Установлено, что более легкий газ (азот по отношению к аргону) при одинаковых значениях объемного расхода транспортирующего газа позволяет отвести от стенки фурмы более значительные тепловые потоки. При этом показано, что диаметр частиц порошка практически не оказывает влияния на тепловые потоки от стенки фурмы к транспортирующему газу. Также важным результатом с точки зрения создания теоретической базы для проектирования эффективных режимов газопорошковой продувки расплава в сталеразливочном ковше являются данные о значительном влиянии коэффициента формы частиц вдуваемого порошка и его концентрации, давления транспортирующего газа, разности скоростей фаз и плотности порошка на силу межфазного взаимодействия. При различном сочетании указанных параметров и нагреве газопорошкового потока до температур 500-600°C сила межфазного взаимодействия может отличаться до 10 раз.

### 3.3 Выводы по главе 3

1. На основании результатов численного моделирования процесса донной продувки расплава рельсовой стали инертным газом в сталеразливочном ковше емкостью 100 т определены следующие закономерности:

- повышение интенсивности продувки (удельного расхода инертного газа) в фактических пределах изменения данного показателя приводит к увеличению мощности перемешивания и коэффициента эффективной диффузии вне зависимости от режима взаимодействия газовых струй с расплавом (струйный или пузырьковый);

- при одинаковой интенсивности продувки мощность перемешивания и коэффициент диффузии имеют большие абсолютные значения при струйном режиме взаимодействия газовых струй с расплавом относительно пузырькового режима взаимодействия;

- повышение удельного расхода инертного газа на продувку в существующем интервале изменения данного параметра обуславливает увеличение коэффициента диффузии во всех направлениях переноса (горизонтальном, вертикальном и радиальном); при этом наибольшие абсолютные значения коэффициента диффузии имеют место в вертикальном направлении, а наименьшие – в радиальном направлении.

2. Численным моделированием газопорошковой продувки расплава через погружную фурму в процессе обработки на агрегате «ковш-печь» для условий ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определены закономерности формирования интенсивности тепловых потоков от стенки фурмы к потоку транспортирующего газа, количественные взаимосвязи параметров газопорошковой смеси, подаваемой через фурмы в расплав, с силой межфазного взаимодействия.

3. Полученные результаты являются теоретической базой для совершенствования режимов продувки инертным газом и разработки режимов вдувания порошковых материалов в расплав, обеспечивающих повышение эффективности рафинирования стали от неметаллических включений.

## **4 Разработка и совершенствование технологических режимов выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения металлургического качества рельсов и технико-экономических показателей производства стали**

### **4.1 Методика и условия проведения промышленных исследований**

Исследование и разработку усовершенствованных режимов ковшевой обработки рельсовой стали проводили в условиях электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Технология производства рельсовой стали в указанном цехе включает в себя следующие основные этапы:

- выплавка полупродукта в дуговой электропечи номинальной емкостью 100т;
- последовательная внепечная обработка расплава на агрегате «ковш-печь» (АКП) и, затем, на ковшевом вакууматоре;
- разливка стали на 4-х ручьевой блюмной МНЛЗ с получением непрерывнолитых заготовок сечением 300×365 мм.

Согласно принятой технологии шихта для выплавки рельсовой стали включает в себя металлическую и неметаллическую части. Металлошихта формируется из твердого чугуна, доля которого регламентирована в пределах от 20% до 60% и лома, в качестве которого используется стальной лом (кусковой, конвертерный, тяжеловесный, рельсовый, хромистый), скрап шлакометаллический, скрап стальковшей, брикеты из стальной и чугунной стружки. По содержанию вредных примесей отдельно выделяют лом категории «чистый» (конвертерный), «получистый» (обрезь от ножниц, рельсовый лом, лом из железнодорожных колес). Соотношение количества и долей различных видов лома регламентированы в узких пределах. Неметаллическая часть шихты включает в себя известь или известняк, флюсы магнезиально известковые марок ФМ-2-1, ФОМИ ФМИ-1, углеродсодержащие материалы (кокс, коксовая мелочь)

и твердые окислители. Целью использования магнезиально-известковых флюсов является продление срока службы футеровки стен печи, углеродсодержащие материалы присаживаются при пониженном расходе чугуна.

Выплавка стали производится одношлаковым процессом с использованием газокислородной системы интенсификации плавки PRIMETALS. С целью ускорения шлакообразования по ходу плавки производится присадка извести в количестве 1-2 т порциями по 200 кг. После расплавления шихты с использованием указанной системы производится интенсивное вспенивание шлака вдуванием через инжекторы коксовой пыли. Возможны варианты технологии, как с завалкой металлошихты на «сухую» подину, так и с завалкой на «болото» (с наличием в печи части металла и шлака предыдущей плавки).

В процессе выпуска металла из печи в сталеразливочный ковш металл продувается аргоном через донные пористые пробки. Под струю металла присаживаются раскислители и легирующие (силикомарганец, ферросилиций, феррохром) вместе с которыми подают твердую шлакообразующую смесь (ТШС), состоящую из извести и плавикового шпата. При этом присадка указанных раскислителей, легирующих и ТШС должна быть завершена до наполнения ковша на 30-50% от его высоты. В случае пониженного содержания углерода в металле на выпуске (менее 0,50%) присаживается науглероживатель.

При обработке на АКП продувка аргоном производится через две донные фурмы. В начальный период обработки производится корректировка жидкоподвижности путем присадки плавикового шпата. Корректировка содержания углерода производится присадкой науглероживателей на поверхность металла. Десульфурация стали обеспечивается за счет наличия раскисленного жидкоподвижного шлака путем продувки аргоном. Раскисление шлака производится одним из перечисленных материалов: порошок кокса, карбид кремния, карбид кальция. Общая длительность обработки на АКП составляет не менее 40 мин.

В период обработки расплава в вакууматоре также проводится его продувка аргоном, при этом во время глубокого вакуумирования, продолжительность

которого составляет не менее 16 мин., реализуется максимальная интенсивность продувки. При необходимости по ходу вакуумирования проводится присадка ферросплавов для корректировки химического состава металла. После снятия вакуума проводится очистительная продувка расплава аргоном длительностью не менее 5 мин. Общая продолжительность обработки стали на вакууматоре составляет не менее 40 мин. Рекомендуемое содержание водорода в стали после вакуумирования регламентировано на уровне не более 0,8 ppm. При более высоком содержании водорода производится повторная обработка глубоким вакуумом при давлении не более 100 Па и продолжительностью не менее 3 мин. После окончания обработки с целью снижения теплотерь металла производится присадка на шлак перлитно-коксовой смеси.

Разливка рельсовой стали производится на 4-х ручьевой МНЛЗ с получением непрерывнолитых заготовок сечением 300×365 мм. Применяется электромагнитное перемешивание металла в кристаллизаторе и технология «мягкого» обжатия слитков. Полученные непрерывнолитые заготовки подвергаются замедленному охлаждению до температур 350-400°C в ямах.

#### **4.2 Исследование и оптимизация режимов продувки расплава инертным газом на агрегате «ковш-печь»**

Продувка расплава рельсовой стали инертным газом является одной из основных операций при обработке на АКП, от режимов проведения которой в значительной степени зависит эффективность процесса рафинирования стали от неметаллических включений. Механизм удаления неметаллических включений из стального расплава в процессе его продувки инертным газом основан на явлении флотации – прилипанию твердых не смачиваемых жидкостью включений к газовым пузырям. Газовые пузыри переносят включения к межфазной границе металл-шлак и далее осуществляется ассимиляция включений шлаком. Исходя из законов термодинамики переход включений с указанной межфазной границы в шлак возможен только при дополнительном воздействии кинетических факторов,

так как процесс указанного перехода сопровождается повышением энергии Гиббса и, соответственно, самопроизвольное его протекание термодинамически невозможно. В роли такого кинетического фактора в данном случае выступает продувка инертным газом, за счет которой происходит обновление нижних слоев шлака, контактирующих с металлом.

Исходя из вышесказанного от выбора оптимальной длительности и интенсивности продувки стального расплава инертным газом в значительной степени зависит полнота протекания процесса удаления неметаллических включений из металла в шлак. При этом с учетом технологических, конструкционных особенностей сталеплавильных цехов, а также их сортамента, очевидно, что оптимальные параметры режимов продувки инертным газом будут значительно отличаться.

Применительно к условиям рассматриваемого цеха на основании результатов статистического анализа и натурных экспериментов (глава 2) установлено, что повышение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом в процессе обработки на АКП в фактических пределах изменения указанных параметров снижают загрязненность неметаллическими включениями рельсовой стали, непрерывнолитых заготовок и производимых из них рельсов.

Опираясь на полученные результаты исследований на первом этапе провели опытно-промышленное опробование режимов обработки расплава рельсовой стали на АКП с увеличенной длительностью продувки за счет организации последовательной обработки расплава рельсовой стали на двух АКП. Выбор указанной схемы внепечной обработки обусловлен тем, что ее реализация позволяет существенно увеличить длительность продувки расплава в ковше без снижения производительности цеха (увеличение длительности продувки при использовании обработки на одном АКП сверх 55 мин. приведет к уменьшению производительности цеха).

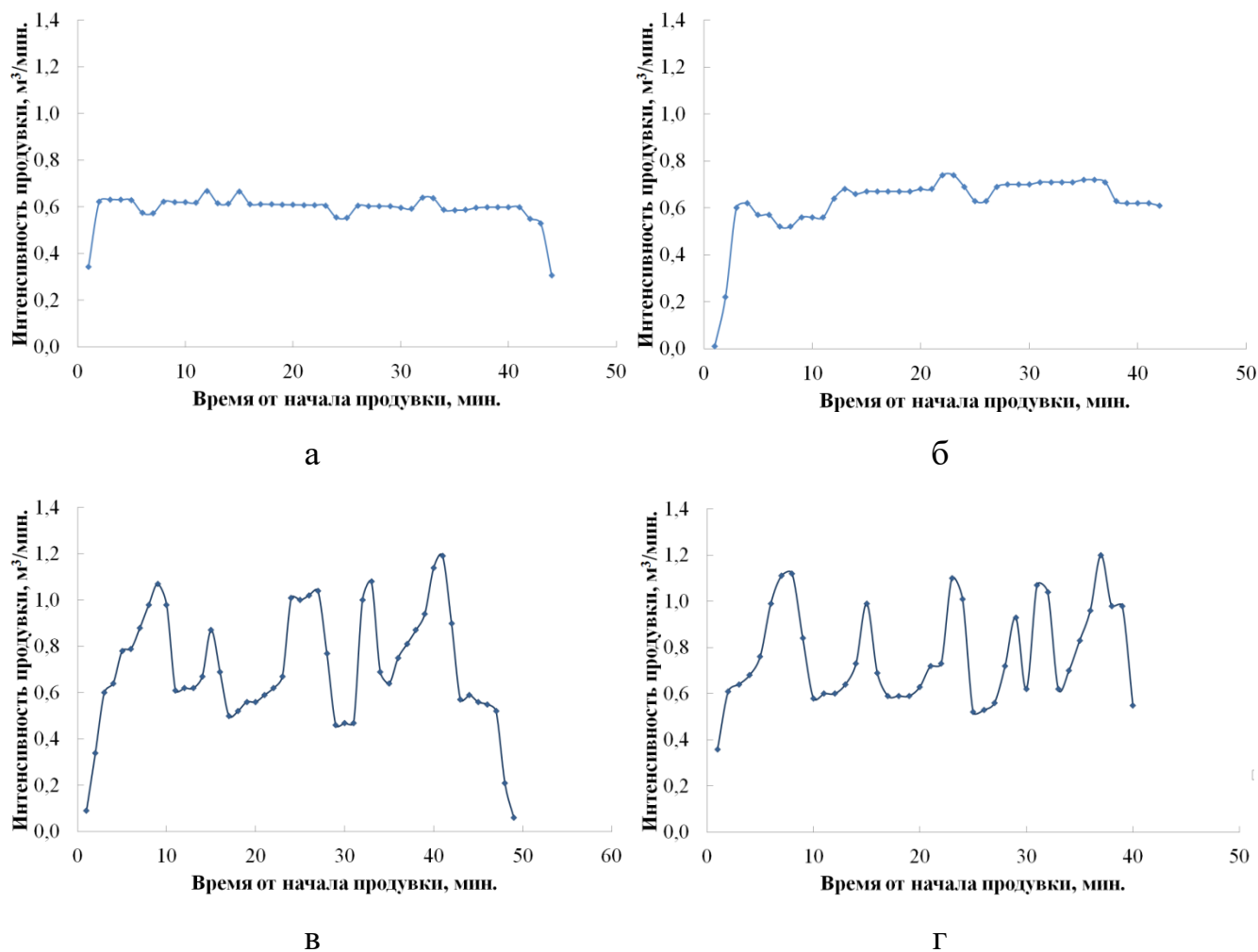
Полученные результаты опробования последовательной обработки рельсовой стали на двух АКП [141, 142] позволили установить, что, несмотря на достигаемое снижение концентрации глиноземистых неметаллических включений

в стали и готовых рельсах, имеет место значительное повышение расхода материалов и энергоресурсов (таблица 4.1), обуславливающие отсутствие экономической целесообразности применения такой технологии.

Таблица 4.1 – Анализ изменения технико-экономических показателей при использовании различных схем внепечной обработки рельсовой стал

Наименование показателя	Средние значения показателя		
	стандартная схема	обработка на двух АКП	отклонени е
Длительность продувки инертным газом при обработке на АКП, мин.	63,0	126,4	+ 63,4
Удельный расход аргона на продувку, м <sup>3</sup> /т	0,24	0,46	+ 0,22
Температура, °С:			
в начале обработки на АКП	1545	1549	+ 4
в конце обработки на АКП	1620	1620	0
Удельный расход электроэнергии при обработке на АКП, кВт·час/т	64,9	92,2	+ 27,3
Расход феррованадия азотированного, кг/т	1,44	1,44	0
Содержание общего кислорода в рельсах, ppm	14	12	- 2
Содержание кислорода, связанного в высокоглиноземистые включения, в рельсах, ppm	10	8	- 2

В результате потенциально эффективным и целесообразным для реализации направлением снижения загрязненности рельсовой стали и рельсов неметаллическими включения следует признать повышение интенсивности продувки расплава инертным газом в ковше. В рамках исследований в данном направлении проведен анализ фактического изменения интенсивности продувки расплава по ходу обработки на АКП. Результаты анализа свидетельствуют, что средняя за время обработки на АКП интенсивность продувки на отдельных плавках изменяется в довольно широких пределах – от 20,1 до 54,8 м<sup>3</sup>/ч (таблица 2.1), что соответствует диапазону 0,34-0,91 м<sup>3</sup>/мин. Однако при этом изменение расхода газа по ходу продувки имеет различный и разнонаправленный характер (рисунок 4.1).



а, б – стабильный удельный расход инертного газа при низкой интенсивности продувки; в, г – нестабильный удельный расход инертного газа

Рисунок 4.1 – Варианты изменения интенсивности продувки расплава в ковше аргоном на плавках текущего производства ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

С учетом представленных данных для более детального анализа влияния изменения интенсивности продувки при обработке на АКП на загрязненность рельсов неметаллическими включениями проведены дополнительные исследования на выборке из 115 плавки стали Э76ХФ. В ходе указанных исследований [143] в рамках каждой плавки выделили периоды с удельной интенсивностью продувки, превышающей 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0 и 1,1 м³/мин соответственно, и затем проанализировали влияние продолжительности указанных периодов на величину отбраковки рельсов из-за скоплений неметаллических включений.

Результаты обработки полученных данных свидетельствуют о значимом влиянии увеличения продолжительности периодов продувки с интенсивностью более 1,1 м<sup>3</sup>/мин на снижение отбраковки рельсов, при этом изменение длительности периодов с меньшей интенсивностью продувки не оказывает влияния на металлургическое качество рельсов (таблица 4.2).

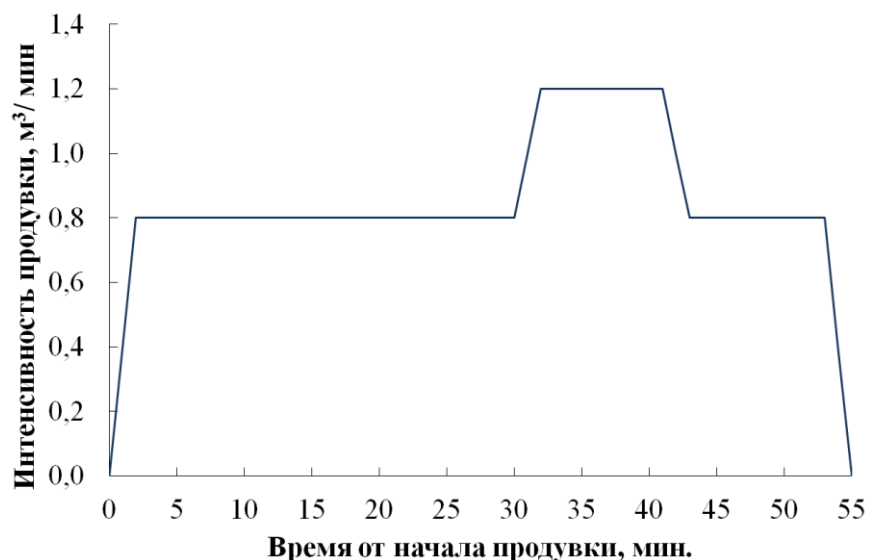
Таблица 4.2 – Влияние изменения удельной интенсивности продувки инертным газом при обработке на АКП на отбраковку рельсов

Показатель	Интенсивность продувки не менее, м <sup>3</sup> /мин.					
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
Диапазон длительности периода с заданной интенсивностью продувки, мин.	0-56	0-42	0-27	0-25	0-12	0-9
Количеством плавов с наличием периода с заданной интенсивностью продувки, шт. / % от общего количества	101/89	82/73	63/56	48/42	34/30	22/19
Коэффициент корреляции с отбраковкой рельсов по модулю	0,12	0,02	-0,04	-0,12	-0,13	-0,24
Критическое значение коэффициента корреляции (по модулю)	0,19					

Таким образом, можно сделать вывод, что критическое значение интенсивности продувки, обеспечивающее снижение концентрации неметаллических включений в рельсах, составляет 1,1 м<sup>3</sup>/мин. При этом с учетом того факта, что продувка металла в ковше производится одновременно через две донные фурмы, критическое значение удельного расхода газа через одну фурму составляет 0,55 м<sup>3</sup>/мин. Повышение удельного расхода инертного газа на продувку расплава способствует увеличению мощности перемешивания (рисунок 3.1) и при достижении установленного критического значения, очевидно, обеспечивает интенсивный переход неметаллических включений с границы раздела металл-шлак в шлак с последующей ассимиляцией данных включений.

Опираясь на полученные результаты, а также с учетом технологических ограничений по повышению интенсивности продувки в ковше для условий рассматриваемого цеха усовершенствован режим продувки расплава аргоном при обработке на АКП (рисунок 4.2). Основными ограничениями по увеличению

интенсивности продувки, принятыми во внимание при разработке нового режима продувки выступили: технические характеристики донных фурм, которые не позволяют увеличивать интенсивность продувки более  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; необходимость снижения интенсивности продувки в период электродугового нагрева расплава и отбора проб.



а



б

Рисунок 4.2 – Усовершенствованный режим продувки расплава аргоном с одним (а) и двумя (б) периодами повышенной интенсивности вдувания газа

Отличительной особенностью нового режима продувки расплава рельсовой стали в ковше инертным газом является наличие периода с повышенным до значений  $35\text{-}40 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,58\text{-}0,67 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) расходом аргона через каждую донную фурму продолжительностью не менее 10 мин. (допускается наличие двух

периодов, продолжительностью не менее 5 мин. каждый). При этом указанный период (или периоды) реализуются во второй половине продувки, но оканчиваются не позднее, чем за 10 мин. до остановки продувки. Наличие таких периодов обеспечивает интенсивное рафинирование расплава от неметаллических включений.

С целью подтверждения эффективности усовершенствованного режима продувки проведены опытно-промышленные исследования. Согласно разработанному плану эксперимента при внепечной обработке 5-ти серий плавов стали Э76ХФ усовершенствованный режим продувки на АКП применяли через одну плавку, а оставшиеся плавки продували согласно стандартному режиму. Это позволило исключить влияние дополнительных факторов на загрязненность рельсовой стали и рельсов неметаллическими включениями.

Результаты экспериментальных исследований (таблица 4.3) свидетельствуют о снижении отбраковки рельсов по внутренним дефектам в среднем на 0,6% при использовании усовершенствованного режима продувки стали аргоном на АКП.

Таблица 4.3 – Влияние режима продувки аргоном при обработке на АКП на отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения

Порядковый номер серии плавов в эксперименте	Режим продувки	Количество плавов	Средняя отбраковка рельсов, %
1	стандартный	12	1,8
	усовершенствованный	11	1,6
2	стандартный	11	2,2
	усовершенствованный	10	1,4
3	стандартный	11	3,1
	усовершенствованный	12	2,6
4	стандартный	10	1,8
	усовершенствованный	10	0,9
5	стандартный	12	2,5
	усовершенствованный	11	1,9
<b>Итого</b>	<b>стандартный</b>	<b>56</b>	<b>2,3</b>
	<b>усовершенствованный</b>	<b>54</b>	<b>1,7</b>

Внедрение нового режима продувки рельсовой стали инертным газом в сталеразливочном ковше при обработке на АКП подтвердило его положительное влияние на металлургическое качество рельсов – отбраковка рельсов снижена на 0,5%, ожидаемый экономический эффект согласно Акту внедрения (Приложение А) составляет 15 млн. руб/год при доле участия автора – 25%.

#### **4.3 Совершенствование режимов раскисления рельсовой стали на выпуске из дуговой электропечи**

Скопления глиноземистых неметаллических включений являются одной из основных причин образования внутренних дефектов рельсов металлургического происхождения и отбраковки рельсов, что подтверждается результатами исследований, проведенных в рамках данной работы (раздел 2), а также данными других исследователей [144, 145].

Концентрация глиноземистых включений напрямую определяется двумя параметрами – окисленностью стали на выпуске из плавильного агрегата в ковш и содержанием алюминия в стали. При этом снижение окисленности электростали является технологически легко осуществимым, но не эффективным методом повышения качества стали. Это обусловлено тем фактом, что уменьшение количества кислорода, вдуваемого через газо-кислородные горелки по ходу электроплавки, обусловит увеличение длительности плавки и, как следствие, уменьшение производительности ДСП и цеха в целом. Кроме того, снижение интенсивности продувки кислородом в процессе выплавки стали приведет к повышению содержания фосфора в стали на выпуске из печи. Это, в свою очередь, обусловит увеличение содержания фосфора в готовой стали, так как по ходу внепечной обработки его содержание не снижается, а наоборот имеет место незначительное повышение концентрации данного элемента, вносимого ферросплавами.

На основании вышесказанного наиболее перспективным направлением по снижению загрязненности рельсовой стали и готовых рельсов глиноземистыми

неметаллическими включениями является снижение содержания алюминия в стали.

Согласно существующей технологии (раздел 4.1) раскисление рельсовой стали алюминием не производится и данный элемент вносится, как остаточная примесь, ферросплавами, а именно ферросилицием и ферросиликомарганцем. При этом наибольшая концентрация алюминия имеет место в ферросилиции (для марки ФС65 содержание алюминия согласно требований ГОСТ 1415-96 ограничено пределами не более 2,5%).

Необходимо отметить, что снижение содержания алюминия в рельсовой стали за счет использования ферросплавов с пониженной концентрацией данного элемента не является однозначно эффективным с технико-экономической точки зрения. Это, в частности, обусловлено тем фактом, что применение новых видов ферросплавов, очевидно, приводит к изменению степени усвоения вносимых ими элементов-раскислителей, а также углерода. Кроме этого значимую роль играет соотношение стоимости ферросплавов и содержания в них элементов-раскислителей.

В рамках развития направления по совершенствованию технологии раскисления рельсовой стали разработан и прошел опытно-промышленное опробование режим присадки ферросплавов на выпуске из дуговой электропечи [146], согласно которому традиционные ферросплавы (ферросилиций ФС65 и силикомарганец МнС18) частично замещаются силикомарганцем марки FeMnSi30HP (таблица 4.4).

По результатам проведения серии опытно-промышленных плавов (40 плавов рельсовой стали Э76ХФ) установлено снижение содержания алюминия в готовой стали (таблица 4.5), что, очевидно, обусловлено значительно пониженным содержанием данного элемента в силикомарганце FeMnSi30HP (таблица 4.6). Кроме того на опытных плавках зафиксировано увеличение степени сквозного усвоения углерода и кремния на 4% и 13 % соответственно (таблица 4.5). Такой эффект обусловлен более глубоким раскислением стали на выпуске из печи за счет ввода большего количества кремния. Фактически на выпуске металла

из дуговой электропечи усвоение углерода на опытных плавках практически в 2 раза превысило данный показатель для сравнительных плавов, а применительно к кремнию разница составила 1,1 раза (таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Сравнительный анализ расхода ферросплавов при различных технологиях раскисления рельсовой стали

Наименование ферросплава	Расход ферросплавов, кг/т		Отклонение, кг/т
	средние значения текущего производства	средние значения на опытных плавках	
Силикомарганец MnC18	10,13	0,11	- 10,02
Ферросилиций ФС65	2,55	0,30	- 2,25
Силикомарганец FeMnSi30HP	0	12,16	+ 12,16

Таблица 4.5 – Усвоение углерода и кремния при использовании различных режимов раскисления рельсовой стали

Наименование показателя	Значение показателя, %		Отклонение, абс. %
	стандартный	опытный	
Содержание алюминия в стали	0,0029	0,0022	-0,0007
Степень усвоения углерода:			
- на выпуске из ДСП;	24,60	49,67	+25,07
- сквозная.	70,28	74,13	+3,85
Степень усвоения кремния:			
- на выпуске из ДСП;	50,64	86,25	+35,61
- сквозная.	79,52	92,48	+12,96

Таблица 4.6 – Химический состав ферросплавов

Марка ферросплава	Содержание элементов, %						
	Si	Mn	C	P	S	Al	Cr
ФС65	63-68	не более 0,4	не более 0,1	не более 0,05	не более 0,02	не более 2,5	не более 0,4
MnC18	15-20	Не менее 65	не более 2,5	не более 0,10	не более 0,02	-	-
FeMnSi30HP	28-35	57-67	не более 0,1	не более 0,20	не более 0,03	0,2	-

Дополнительно проведенный сравнительный анализ механических свойств, как нетермообработанных рельсов, так и рельсов после термической обработки из плавок, произведенных с использованием стандартной и усовершенствованной технологий раскисления стали в ковше, показал отсутствие значимых отличий между ними (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Сравнительный анализ механических свойств рельсов при использовании различных режимов раскисления рельсовой стали

Наименование показателя	Средние значения показателя		отклонение
	текущее производство	опытные плавки	
нетермообработанные рельсы			
Временное сопротивление, МПа	1085	1086,8	+ 1,8
Предел текучести, МПа	628,5	601,4	- 27,1
Относительное удлинение, %	11,3	10,7	- 0,6
Относительное сужение, %	17,0	17,8	+ 0,8
Твердость, НВ	328	327	- 1
термообработанные рельсы			
Временное сопротивление, МПа	1271,4	1270	- 1,4
Предел текучести, МПа	920,4	942,5	+ 22,1
Относительное удлинение, %	12,6	11,3	- 1,3
Относительное сужение, %	35,8	32,0	- 3,8

При этом зафиксировано снижение отбраковки рельсов при ультразвуковом контроле их структуры на 0,4% за счет уменьшения дефектов в виде скоплений неметаллических включений и уменьшение удельных затрат на раскисление стали на 14 руб/т.

Суммарная ожидаемая экономическая эффективность от снижения отбраковки рельсов и снижения себестоимости рельсовой стали составила 23 млн. руб/год при доле участия автора 20% (Акт внедрения представлен в Приложении А).

#### **4.4 Оптимизация состава металлозавалки электроплавки рельсовой стали с целью повышения технико-экономических показателей ее производства**

Результаты исследований процессов формирования металлургического качества рельсов на этапах выплавки и внепечной обработки рельсовой стали, полученные в данной работе (раздел 2), свидетельствуют об отсутствии значимого влияния соотношения чугуна и лома в металлозавалке электроплавки рельсовой стали на металлургическое качество рельсов. Это объясняется разнонаправленным влиянием доли чугуна в металлошихте на показатели качества рельсовой стали, оказывающие значимое влияние на формирование внутренних дефектов рельсов. Так, например, повышение доли чугуна в металлозавалке закономерно обуславливает повышение содержания фосфора в готовой стали, однако, при этом, одновременно происходит снижение концентрации в ней примесей цветных металлов (медь, олово).

Согласно имеющихся литературных и производственных данных (представленных в разделе 1) соотношение лома и чугуна в металлошихте электроплавки оказывает значительное влияние, как на удельные расходы сырья и материалов, формирующие себестоимость рельсовой стали, так и на производительность электропечи. Таким образом, выбор оптимального состава металлошихты целесообразно производить исходя из влияния доли чугуна в металлозавалке на технико-экономические показатели выплавки стали (удельные расходы энергии, сырья и материалов, производительность дуговой электропечи).

Исходя из теоретических основ процессов, происходящих при выплавке стали в дуговых электропечах можно обоснованно предположить, что частичное замещение металлического лома твердым чугуном приведет к снижению расхода электроэнергии на расплавление шихты, однако при этом параллельно произойдет увеличение расхода кислорода для окисления избыточного углерода из расплава. Корректировка состава металлошихты путем изменения соотношения лома и чугуна также может привести к изменению расхода марганецсодержащих

ферросплавов, присаживаемых на выпуске металла из печи, из-за различного содержания данного элемента в чугунах и металлическом ломе. Вследствие значимых отличий химического состава лома и чугуна при изменении их доли в металлозавалке произойдет изменение химического состава формирующегося шлака, что приведет к изменению расхода шлакообразующих материалов, прежде всего, извести.

Следует отметить, что зависимости перечисленных удельных расходов параметров от состава металлозавалки электроплавки могут иметь выраженный нелинейный характер. Данный факт обусловлен тесной взаимосвязью отдельных технологических параметров выплавки стали, а также для определенного интервала изменения доли чугуна в металлошихте влияние данного фактора на отдельные из перечисленных удельных расходов сырья и материалов могут оказаться не значимыми.

Характер влияния состава металлической шихты на производительность электропечей является сложным, что связано с разнонаправленным изменением продолжительности различных периодов плавки, формирующих ее полный цикл. Например, увеличение расхода чугуна взамен металлического лома приводит к одновременному снижению периода плавления и увеличению окислительного периода.

Следует отметить, что для получения количественных зависимостей параметров электроплавки от соотношения чугуна и лома в завалке, адекватно отображающих реальную ситуацию, необходимым условием является статистическая обработка массива данных для конкретного сталеплавильного агрегата за период времени со стабильной технологией производства.

Данный подход реализован при исследованиях влияния состава металлошихты на технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [147-154]. Проведены статистические исследования влияния соотношения лома и чугуна в металлозавалке на технико-экономические показатели производства рельсовой стали в период, характеризующийся следующей технологической схемой

производства: выплавка в дуговой сталеплавильной печи с использованием 20-50% твердого (чушкового) чугуна, последовательная внепечная обработка на агрегате «ковш-печь» и вакууматоре и разливка на МНЛЗ в заготовки сечением 300×365 мм.

С учетом вышеприведенных данных о влиянии состава металлошихты на параметры электроплавки, а также исходя из набора параметров, инструментально фиксируемых в анализируемом сталеплавильном цехе, исследовали влияние состава металлозавалки на следующие показатели работы электропечей при выплавке рельсовой стали:

- удельный расход электроэнергии;
- удельный расход кислорода;
- удельный расход извести;
- содержание марганца на выпуске из печи;
- безвозвратные потери металла (угар);
- длительность плавки.

В качестве базы для исследования использовали массив из 500 плавков рельсовой стали марки Э76ХФ. Выбор указанной марки обусловлен ее наибольшей долей в сортаменте рассматриваемого цеха.

На основании проведенных исследований установлено, что соотношение чугуна и лома в металлошихте электроплавки рельсовых сталей оказывает значимое влияние на следующие параметры:

- удельный расход электроэнергии;
- удельный расход кислорода;
- содержание марганца на выпуске из печи;
- длительность плавки.

При повышении доли чугуна в металлошихте удельный расход электроэнергии имеет тенденцию к снижению (рисунок 4.3 а). Механизм влияния замещения части лома чугуном объясняется пониженной температурой плавления чугуна по сравнению с ломом.

Согласно полученным данным при повышении доли чугуна в

металлозавалке удельный расход кислорода возрастает по параболическому закону (рисунок 4.3 б). В целом повышение расхода кислорода при увеличении доли чугуна в металлической шихте, как показано выше, обусловлено необходимостью окисления дополнительного углерода, вносимого чугуном. Параболический же характер полученной зависимости свидетельствует о вынужденном увеличении интенсивности продувки кислородом для снижения продолжительности окислительного периода и плавки в целом.

Показано, что увеличение доли чугуна в металлической шихте приводит к значительному снижению содержания марганца на выпуске из дуговой печи (рисунок 4.3 в). Это объясняется совокупным влиянием двух факторов: пониженным содержанием марганца в чугуне относительно лома и повышенным окислением марганца за счет увеличения продолжительности и интенсивности продувки кислородом.

Зависимости, полученные на основе статистической обработки данных, свидетельствуют о выраженном параболическом характере влияния доли чугуна в металлозавалке на длительность плавки (рисунок 4.3 г). На графике имеется выраженный минимум, который находится в интервале 30-35%. Полученный характер зависимости, очевидно, обусловлен разнонаправленным влиянием увеличения расхода чугуна на продолжительность отдельных периодов электроплавки при одновременном нелинейном изменении продолжительности самих периодов. Как показано выше увеличение расхода чугуна снижает продолжительность периода плавления, однако при этом происходит увеличение длительности окислительного периода. С учетом того, что продолжительность окислительного периода частично снижают за счет повышения интенсивности вдувания кислорода (с учетом существующих технических ограничений по увеличению интенсивности продувки) изменение длительности данного периода, очевидно, будет нелинейным при повышении расхода чугуна на плавку.

Вышеприведенные аналитические зависимости характеризуют количественную взаимосвязь между долей чугуна в металлозавалке и параметрами, прямо или косвенно влияющими на себестоимость рельсовой стали.

К параметрам, оказывающим прямое влияние на затраты при производстве стали, можно отнести удельные расходы электроэнергии и кислорода. Косвенное влияние на себестоимость рельсовой стали оказывает содержание марганца на выпуске из печи, поскольку от него зависит удельный расход марганецсодержащих ферросплавов.

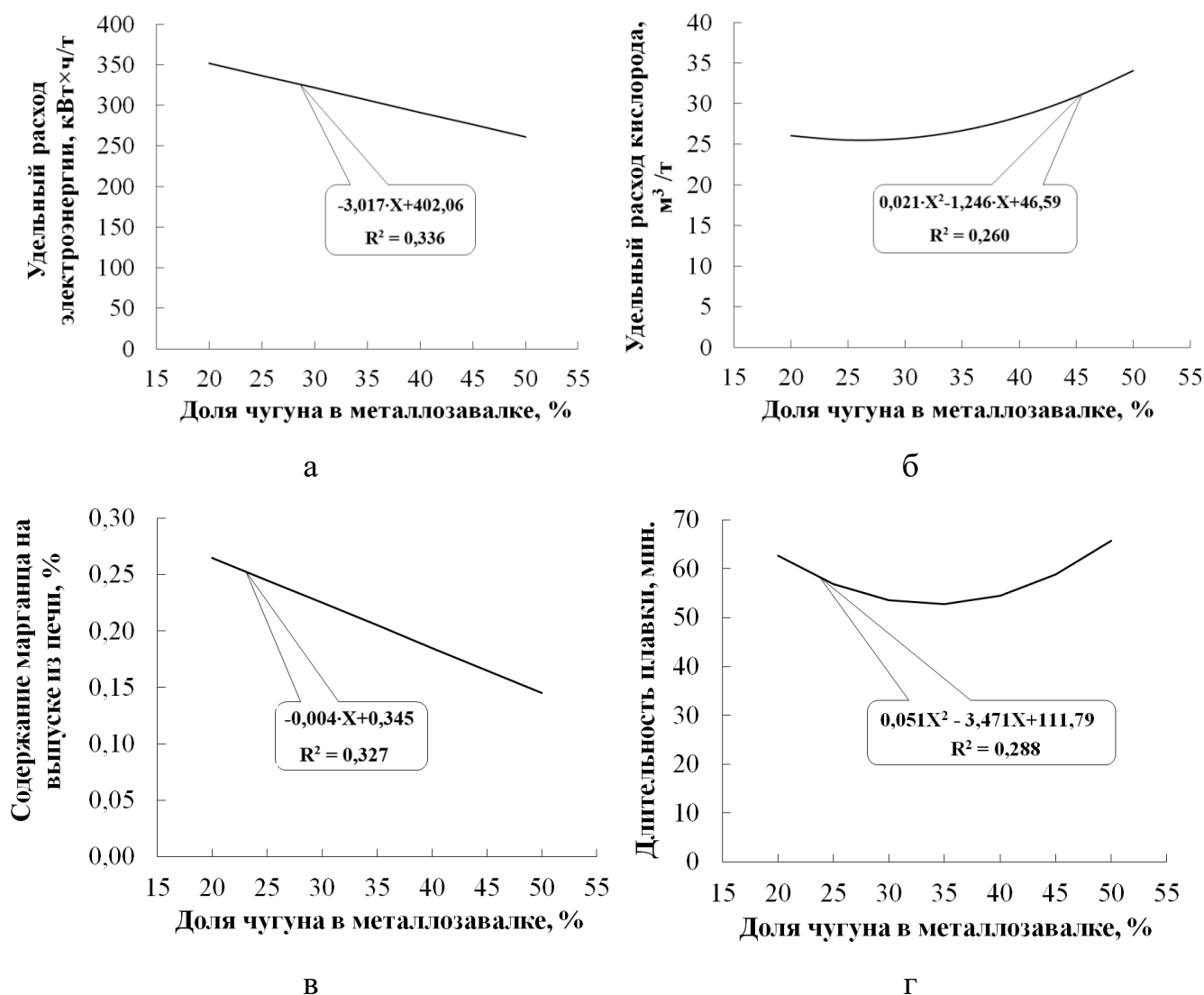


Рисунок 4.3 – Влияние доли чугуна в металлозавалке электроплавки рельсовой стали на удельные расходы электроэнергии (а), кислорода (б), содержание марганца на выпуске из печи (в) и цикл плавки (г)

При этом следует учитывать, что степень влияния изменения указанных параметров на себестоимость стали зависит не только от их количественного изменения при варьировании состава металлошихты, но и от непостоянства цен

на них в различные временные периоды. Также непостоянство цен характерно и для самих составляющих металлозавалки – лома и чугуна. Имеют место сезонные, или вызванные иными причинами достаточно значительные колебания цен на данные виды металлической шихты.

Указанное влияние изменения стоимости сырья, материалов и энергоносителей учтено при разработке статистической модели прогнозирования технико-экономических показателей электросталеплавильного цеха в зависимости от состава металлозавалки.

В качестве параметра оптимизации в модели выступают суммарные затраты на шихтовые материалы (чугун и лом), электроэнергию, кислород, ферросплавы:

$$Z_{\text{СУМ}} = (P_{\text{ЧУГ}} \cdot C_{\text{ЧУГ}} + P_{\text{ЛОМ}} \cdot C_{\text{ЛОМ}} + P_{\text{ЭЛ.ЭН.}} \cdot C_{\text{ЭЛ.ЭН.}} + P_{\text{КИСЛ.}} \cdot C_{\text{КИСЛ.}} + P_{\text{ФЕР.}} \cdot C_{\text{ФЕР.}}), \quad (4.1)$$

где  $P_{\text{ЧУГ}}$ ,  $P_{\text{ЛОМ}}$ ,  $P_{\text{ЭЛ.ЭН.}}$ ,  $P_{\text{КИСЛ.}}$ ,  $P_{\text{ФЕР.}}$  – удельные расходы чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно;

$C_{\text{ЧУГ}}$ ,  $C_{\text{ЛОМ}}$ ,  $C_{\text{ЭЛ.ЭН.}}$ ,  $C_{\text{КИСЛ.}}$ ,  $C_{\text{ФЕР.}}$  – цена чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно.

Расход марганецсодержащих ферросплавов обратно пропорционален содержанию марганца на выпуске из печи. С учетом содержания марганца в ферросплаве и его угаром удельный расход ферросплавов определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{ФЕР.}} = \frac{10 \cdot (C_{\text{ГОТ}} - C_{\text{ВЫП}})}{C_{\text{Ф}} \cdot (100 - Y)}, \text{ т/т} \quad (4.2)$$

где  $C_{\text{ГОТ}}$ ,  $C_{\text{ВЫП}}$ ,  $C_{\text{Ф}}$  – содержание марганца в готовой стали, на выпуске из печи и в ферросплаве соответственно, %;  $Y$  – угар марганца, %.

Модель реализована в программе «EXCEL». В качестве исходных данных используются цены на чугун, металлический лом, электроэнергию, кислород и марганецсодержащие ферросплавы, средняя масса металлозавалки, выход жидкой стали, фактическое время работы цеха, среднее содержание марганца в ферросплавах, угар марганца при раскислении и легировании (рисунок 4.4).

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Средняя масса металлозавалки	т	120
Выход жидкой стали	%	95
Фонд времени работы цеха	сут./год	300
Цена чугуна	руб/т	19000
Цена металлолома	руб/т	26000
Цена электроэнергии	руб/(кВт*час)	2
Цена кислорода	руб/куб. м	5
Цена марганецсодержащего ферросплава	руб/т	110000
Среднее содержание марганца в ферросплаве	%	50
Среднее содержание марганца в готовой стали	%	0,8
Средний угар марганца	%	15

Рисунок 4.4 – Общий вид «окна» для ввода исходных данных

На основе исходных данных для диапазона изменения доли чугуна в металлозавалке от 20% до 50% с использованием полученных регрессионных уравнений (рисунок 4.3) по формуле (4.1) производится расчет суммарных затрат на чугун, металлический лом, электроэнергию, кислород, ферросплавы и расчет производительности цеха. Результаты указанных расчетов представляются в графическом виде, примеры которых представлены на рисунках 4.5 и 4.6.

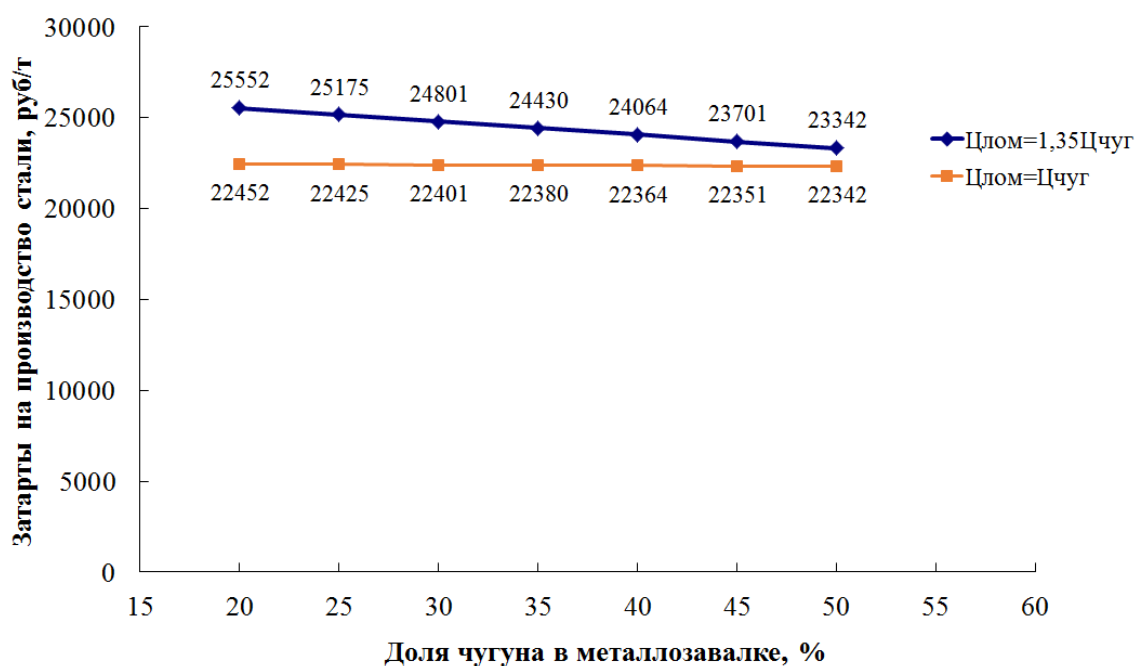


Рисунок 4.5 – Зависимость затрат на производство рельсовой стали от состава металлозавалки

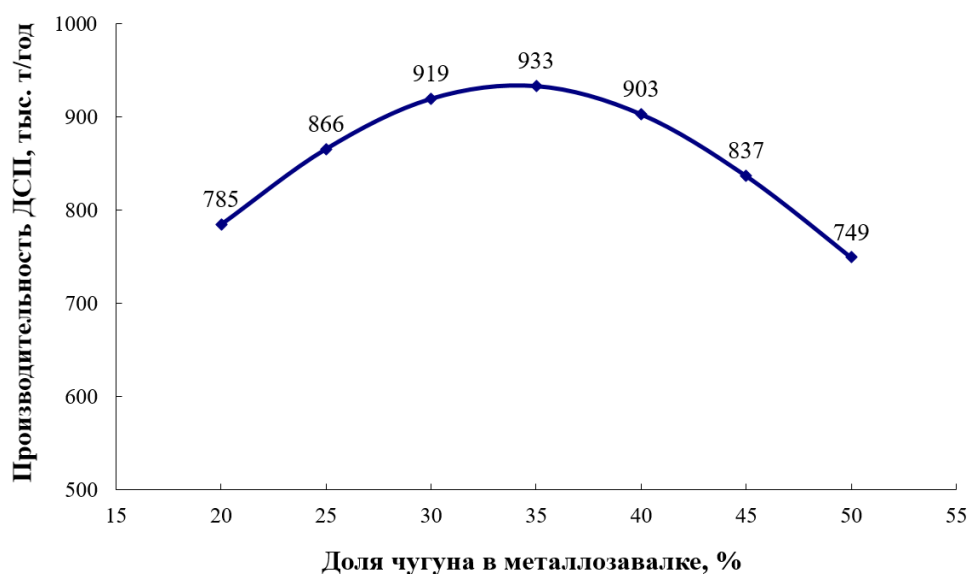


Рисунок 4.6 – Зависимость производительности дуговой сталеплавильной печи от состава металлозавалки при производстве рельсовой стали

Использование разработанной модели позволяет выработать обоснованные рекомендации по оптимизации доли чугуна в металлозавалке для текущего уровня цен на используемые при электроплавке материалы и энергоносители с учетом изменения производительности цеха. Модель применяется для определения оптимального соотношения чугуна и лома в металлозавалке при выплавке рельсовой стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено Актом внедрения.

#### 4.5 Выводы по главе 4

1. На основании результатов комплексных исследований влияния режимов внепечной обработки рельсовой стали на показатели ее качества усовершенствован режим продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь». Отличительной особенностью усовершенствованного режима продувки рельсовой стали инертным газом является наличие во второй половине продувки периода с повышенным расходом газа; при этом длительность такого периода составляет не менее 10 мин. и возможен вариант разбивки данного периода на две части. Опытно-промышленные эксперименты, проведенные в условиях действующего электросталеплавильного цеха, подтвердили повышение

степени рафинирования рельсовой стали от неметаллических включений при его использовании. Зафиксировано снижение отбраковки рельсов по неметаллическим включениям на 0,5%, ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 15 млн. руб/год при долевом участии автора 25%, что подтверждено соответствующим Актом внедрения.

2. Усовершенствован режим раскисления рельсовой стали на выпуске из дуговой печи в сталеразливочный ковш. Показано, что частичная замена традиционных марок ферросилиция и силикомарганца на силикомарганец с пониженным содержанием алюминия позволяет снизить загрязненность рельсовой стали глиноземистыми неметаллическими включениями при одновременном повышении степени сквозного усвоения углерода и кремния на 4% и 13% соответственно. Ожидаемый экономический эффект от внедрения указанного технического решения, полученный за счет уменьшения отбраковки рельсов на 0,4% и снижения затрат на раскисление, подтвержденный соответствующим Актом, составляет 23 млн. руб/год при долевом участии автора 20%.

3. На основании статистических исследований определены и обобщены в виде аналитических зависимостей закономерности влияния состава металлозавалки электроплавки рельсовой стали на удельные расходы материалов и энергоносителей при ее производстве, а также на производительность дуговой электропечи. На базе указанных аналитических зависимостей разработана и реализована в «EXCEL» модель прогнозирования технико-экономических показателей выплавки рельсовой стали в дуговой электропечи при варьировании состава металлозавалки, использование которой позволяет выработать обоснованные рекомендации по оптимизации доли чугуна в металлошихте для текущего уровня цен на используемые при электроплавке материалы и энергоносители с учетом изменения производительности цеха. Модель применяется при определении оптимального соотношения чугуна и лома в металлозавалке при выплавке рельсовой стали в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено Актом внедрения.

## Заключение

1. Комплексными исследованиями определен механизм формирования характерных внутренних дефектов рельсов металлургического происхождения при их производстве из вакуумированных электросталей, легированных хромом и ванадием. Показано, что такие дефекты, являющиеся причиной отбраковки рельсов при ультразвуковом контроле качества их структуры, преимущественно представляют собой расслоения в шейке рельсовых профилей со скоплениями алюмосиликатов, оксидов кремния и алюминия, сульфидов марганца. На основании статистических и металлографических исследований установлено, что на снижение вероятности образования указанных дефектов значимое влияние оказывает уменьшение окисленности стали на выпуске из печи, повышение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь», снижение содержания серы, фосфора, меди и олова в готовой стали.

2. По результатам численного моделирования процесса продувки расплава рельсовой стали инертным газом в сталеразливочном ковше емкостью 100 т через донные фурмы определено, что увеличение интенсивности указанной продувки в диапазоне от 10 до 85 м<sup>3</sup>/ч приводит к линейному увеличению мощности перемешивания и нелинейному росту коэффициента эффективной диффузии вне зависимости от режима взаимодействия газовых струй с расплавом и направления переноса. При этом для струйного режима взаимодействия газовых струй с расплавом мощность перемешивания и интенсивность диффузионных процессов значительно выше по сравнению с пузырьковым режимом истечения газовых струй, наиболее интенсивно диффузионные процессы протекают в вертикальном направлении переноса, а наименее интенсивно – в радиальном направлении.

3. Математическим моделированием газопорошковой продувки расплава в сталеразливочном ковше через погружную фурму, проведенным с целью разработки эффективных режимов вдувания порошковых реагентов, определены закономерности формирования интенсивности тепловых потоков от стенки

фурмы к потоку транспортирующего газа, количественные взаимосвязи параметров газопорошковой смеси, подаваемой через фурмы в расплав, с силой межфазного взаимодействия.

4. По результатам статистических исследований определен характер и степень влияния состава металлозавалки электроплавки рельсовой стали на технико-экономические показатели ее производства. Установлено, что увеличение доли чугуна в металлозавалке в диапазоне от 20% до 50% способствует снижению удельного расхода электроэнергии на выплавку стали, однако при этом происходит увеличение удельного расхода кислорода и марганецсодержащих ферросплавов. Влияние состава металлозавалки на длительность плавки имеет нелинейный характер с выраженным минимумом при доле чугуна 30-35%.

5. На базе результатов проведенных исследований разработаны, прошли опытно-промышленное опробование и внедрены в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК»:

- новый режим продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь» с выделенным периодом повышенной интенсивности вдувания газа во второй половине продувки; ожидаемый экономический эффект согласно Акту внедрения, полученный за счет снижения отбраковки рельсов по неметаллическим включениям на 0,5%, составляет 15 млн. руб/год при долевом участии автора – 25%;

- новая технология раскисления рельсовой стали на выпуске из печи с использованием ферросплавов с пониженным содержанием алюминия, позволяющая снизить загрязненность рельсовой стали глиноземистыми неметаллическими включениями при одновременном повышении степени сквозного усвоения кремния и углерода и снижении затрат на раскисление; ожидаемая экономическая эффективность внедрения составляет 23 млн. руб/год при долевом участии автора – 20% (подтверждено Актом внедрения);

- модель прогнозирования технико-экономических показателей производства рельсовой электростали при варьировании состава металлозавалки и изменяющемся уровне цен на сырье, материалы и энергоносители.

6. Результаты диссертационной работы внедрены и используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», что подтверждено соответствующей Справкой.

## Библиографический список

1. Воронина, О. Н. Эволюция технических требований к рельсам в Российской империи – СССР – Российской Федерации (Конец XIX – Начало XXI В.) / О. Н. Воронина, В. Н. Тарасова // Вопросы истории естествознания и техники. – 2013. – Т. 34 – №1 С. 99-114 .

2. ГОСТ 24182-80. Рельсы железнодорожные широкой колеи типов Р75, Р65 и Р50: Технические условия: дата введения 1981-07-01 / Государственный комитет по стандартам СССР. – Изд. официальное. – Москва: Издательство стандартов, 1988. – 18 с.

3. ГОСТ Р 51685-2000. Рельсы железнодорожные: Технические условия: дата введения 2001-07-01 / Госстандарт России. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 24 с.

4. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные: Технические условия: дата введения 2014-07-01. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

5. ГОСТ Р 51685-2022. Рельсы железнодорожные: Технические условия: дата введения 2023-08-01 / Российский институт стандартизации. – Изд. официальное. – Москва: ФГБУ «Институт стандартизации», 2014. – 110 с.

6. Уманский, А. А. Разработка технологических решений по повышению качества железнодорожных рельсов за счет совершенствования технологии выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки рельсовой электростали / А. А. Уманский, А. С. Борисов, С. В. Фейлер // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79. № 7. С. 566-574.

7. Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г.

<http://government.ru/docs/all/145440/>

8. Перспективы развития рельсового производства в России / А. И. Борц, Е. А. Шур, В. А. Рейхарт, С. В. Хлыст, А. В. Гонтарь // Промышленный

транспорт XXI век. – 2017. – № 3-4. – С. 41-45.

9. Головатенко, А. В. Основные тенденции развития рельсопрокатного производства в России и за рубежом / А. В. Головатенко, А. А. Уманский, В. В. Дорофеев // В сборнике: Металлургия: технологии, инновации, качество. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2015. – С. 10-16.

10. Качество кислородно-конвертерной рельсовой стали и рельсов / М. С. Гордиенко [и др.] // Производство железнодорожных рельсов и колес. – Харьков, 1977. – Вып. V. – С. 27-31.

11. Поляков, В. В. Исследование технологии выплавки в кислородном конвертере и разливки на УНРС рельсовой стали марки К76 / В. В. Поляков, В. Н. Шоршин, В. П. Нехаев // Производство черных металлов: Сб. трудов. – М.: Металлургия, 1970. – С.123-132.

12. Харченко, Б. В. Особенности технологии выплавки рельсовой стали в кислородных конвертерах / Б. В. Харченко, М. С. Гордиенко, В. А. Плохих // Производство стали в кислородно-конвертерных и мартеновских цехах: Тематич. отр. сб. – М.: Металлургия, 1979. – №8. – С.34-38.

13. Освоение технологии выплавки металла для производства рельсов с нагревом лома / Лапицкий В. В. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1988. – Вып. 10 (1062). – С.35-36.

14. Особенности работы дуговых сталеплавильных печей с применением жидкого чугуна (ОАО «ММК») / Ивин Ю. А., Великий А. Б., Саранчук Н. В., Валиахметов А. Х., Алексеев Л. В. // Сталь. – 2008. – №7. – С. 49-50.

15. Обласов, Г. А. Выплавка стали 20А для труб в хладокоррозионно-стойком исполнении / Г. А. Обласов, А. В. Мурзин // Сталь. – 2001. – №10. – С. 15–18.

16. Тимофеев, Е. С. Влияние горячебрикетированного железа на качество стали / Е. С. Тимофеев, Е. В. Головкин, А. С. Тимофеева // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – №1. – С. 29.

URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=22046>.

17. Исследование технологических особенностей выплавки рельсовой

электростали с использованием железа прямого восстановления / Уманский А.А., Бойков Д.В., Кузнецов Е.П., Тверской А.Б., Захарова Т.П. // Сталь. – 2019. – №7. – С. 20-22.

18. Влияние концентрации кремния в низкомарганцовистом чугуна на технологические показатели конвертерного процесса / Смирнов Л.А., Спирин С.А., Ровнушкин В.А. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научной, технической и экономической информации. – 2017. – № 1 (1405). – С. 46-54.

19. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. – М. «Мир», 2003. – 527 с.

20. Кудрин, В. А. Внепечная обработка чугуна и стали / В. А. Кудрин. – М.: Металлургия. 1992. – 336 с.

21. Шишкин, Ю. И. Теория и технология конвертерных процессов / Ю. И. Шишкин, А. К. Артыкбаев, О. А. Григорова. – Алматы.: Ғылым, 2006. –192 с.

22. Старов, Р. В. Малошлаковая технология конвертерной плавки/ Р. В. Старов, Н. М. Омесь, В. Г. Горобец [и др.] // Сталь. – 1989. – № 5. – С. 25- 28.

23. Oita, M. Оптимизация условий продувки сверху при работе по малошлаковой технологии / M. Oita // Iron and Steel Inat. Japan. – 1987. – Vol. 73. – №12. – p.1018.

24. Освоение технологии выплавки металла для производства рельсов с нагревом лома / Лапицкий В. В. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1988. – Вып. 10 (1062). – С.35-36.

25. Хмиров, В. П. Производство кислородно-конвертерной рельсовой стали / В. П. Хмиров, М. С. Гордиенко, В. А. Махницкий // Металлург. – 1987. – №3. – С.20-21.

26. Разработка промышленной технологии производства и исследования качества железнодорожных рельсов из кислородно-конвертерной стали / Лемпицкий В. В. [и др.] // Сталь. – 1980. – №2. – С.142-145.

27. Выплавка рельсовой стали в 250-т конвертерах при переделе чугуна с 0,07% марганца / Старов Р. В. [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. –1985. – №4. – С.13-14.

28. Производство рельсов из кислородно-конвертерной стали / Маликова Л. П. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1986. – Вып. 17. – С.46-47.
29. Внедрение технологии выплавки рельсовой стали в кислородном конвертере – эффективный путь ресурсосбережения при производстве и эксплуатации транспортного металла / Сталинский Д. В., Ботштейн В. А., Рудюк А. С. [и др.] // Экология и промышленность. – 2012. – № 4 (33). – С. 98-103.
30. Особенности конвертерного передела ванадиевого чугуна дуплекс-процессом с использованием стального лома (НИКОМ-процесс) / Смирнов Л. А. [и др.] // Сталь. – 2000. – №11. – С.33-38.
31. Klisiewicz, Z. Производство рельсовой стали в конвертерном цехе комбината в Катовице / Z. Klisiewicz // Hutnik. – 1987. – Т.53. – №3. – С. 62-64.
32. Кек, Н. Технология изготовления рельсов на фирме Фест альпинен шинен / Н. Кек // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. – Т.3 –М.: Металлургия, 1994. – С.157-163.
33. Лобачев, Т. В. Производство рельсовой стали и рельсов / В. Т. Лобачев // Сталь. – 1989. – №2. – С.25-27.
34. Выплавка рельсовой стали в электропечах / Дерфель А. Г. [и др.] // Известия. вузов. Черная металлургия. – 1972. – №2. – С.61-63.
35. Разливка рельсовой стали на УНРС / Лучинкин А. А. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1990. – Вып. 9 (1097). – С. 51-52.
36. Непрерывная разливка рельсовой стали / Нестеров Д. К. [и др.] // Металлург. – 1988. – №10. – С. 40.
37. Выплавка и непрерывная разливка рельсовой стали / Нестеров Д. К. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1988. – Вып. 12 (1064). – С. 40-41.
38. Актуальные проблемы производства рельсов / Под. ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2001. – 260 с.
39. Применение жидкого чугуна в дуговых электропечах / Катунин А. И. [и др.] // Металлург. – 2000. – №6. – С.32.

40. Использование жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах / Годик Л. А. [и др.] // Электromеталлургия. – 2002. – №1. – С.9-14.
41. Железнодорожные рельсы из электростали / Козырев Н. А., Павлов В. В., Годик Л. А., Дементьев В. П.. – Новокузнецк, 2006. – 388 с.
42. Экономические аспекты использования жидкого чугуна в электросталеплави́льном производстве / Катунин А. И. [и др.] // Metallurg. – 2000. – № 11. – С.38-39.
43. Экономические аспекты использования жидкого чугуна / Катунин А. И. [и др.] // Сталь. – 2001. – №7. – С. 26-27.
44. Экономические и технологические аспекты использования жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах / Катунин А. И. [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – №4. – С. 24-26.
45. Освоение технологии выплавки рельсовой стали низкотемпературной надежности с пониженным содержанием водорода / Годик Л. А. [и др.] // Вестник горно-металлургической РАЕН. Отделение металлургии: Сб. науч. тр. – Вып. 27. – Новокузнецк: Изд-во. СибГИУ, 2011. – С. 81-84.
46. Разработка и освоение технологии внепечной обработки рельсовой стали низкотемпературной надежности, обеспечивающей высокий уровень ее служебных свойств / Павлов В. В. [и др.] // Актуальные проблемы электromеталлургии, сварки, качества. Тр. Междунар. науч.-практич. конф. 25-26 мая 2006 г. – Т 1. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006. –С. 135-141.
47. Влияние модифицирования РЗМ на формирование неметаллических включений в высокоуглеродистых сталях / Смирнов Л. А., Ровнушкин В. А., Добужская А. Б. [и др.] // Сталь. – 2016. – №11. – С. 21-28.
48. Эффективность рафинирования рельсовой стали различными способами внепечной обработки / Ивашина Е.Н. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1977. – Вып. 10 (798). – С. 37-38.
49. Исследование и разработка способа коренного улучшения качества рельсовой стали путем внепечного рафинирования / Ивашина Е. Н. [и др.] // Производство железнодорожных рельсов и колес: Отраслевой сборник научных

трудов.– Вып. V. – Харьков.: изд. УкрНИИМ, 1977. – С. 16-18.

50. Влияние внепечного рафинирования на загрязненность металла неметаллическими включениями и механические свойства рельсов / Ивашина Е.Н. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1977. – Вып. 21 (809). – С. 38-39.

51. Анализ различных вариантов технологии раскисления рельсовой стали в условиях ОАО НТМК / Гарбер А. К., Арсенкин А. М., Григорович К. В. [и др.] // Электрометаллургия. – 2008. – № 10. – С. 1-10.

52. Колосова, Э. Л. Исследование природы неметаллических включений в рельсовой стали, раскисленной FeSiCa и SiZr / Э. Л. Колосова, В. И. Сырейщикова, В. А. Минеева // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – №12. – С. 56-58.

53. Раскисление рельсовой стали сплавами, содержащими Cu, Zr, Al / Дерябин А. А., Семенов В. Е., Топычанов Б. И. [и др.] // Бюл. Черная металлургия. – 1986. – №17. – С. 47-48.

54. Разработка комплексных сплавов и технологии их применения раскисления и модифицирования стали. / Мелеков В. А., Прокопенко С. А., Паляничка В. А., Висторовский Н. Т. // Тематический сборник научных трудов «Производство стали в конвертерных и мартеновских печах», М., 1988. – С. 86-88.

55. Снижение загрязненности рельсов строчечными включениями при раскислении стали алюмобарием. / Дерябин А. А., Колосова Э. Л., Сырейщикова В. И. [и др.] // Бюл. "Черная металлургия". – 1981. – №15. – С. 57-58.

56. Раскисление рельсовой стали комплексными сплавами. / Ткаченко А. И., Критинин И. А., Жидков В. Д. [и др.] // Бюл. НТИ "Черная металлургия". – 1981. – №17. – С. 60-61.

57. Качество и служебные свойства рельсов из стали, раскисленной сплавами с Al и Ca. / Великанов А. В., Рейнхарт В. А., Добужская А. Б. [и др.] // Сборник «Повышение эффективности и надежности рельсов». – М.: 1990. – С.40-53.

58. Опыты по выпечному вакуумированию рельсовой стали на установке порционного типа / Сладкошестев В. Т. [и др.] // Производство железнодорожных рельсов и колес: Отраслевой сб. науч. тр. – Вып. V. – Харьков, 1977. – С. 19-22.

59. Повышение качества рельсового металла путем выпечного вакуумирования / Фетисов А. А. [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень ЦНИИИ и ТЭИ ЧМ. – 1999. – №11-12 (1199-1200). – С.35-36.

60. Бойков, Д. В. Разработка и внедрение технологий выплавки и выпечной обработки рельсовой электростали: диссертация .... канд. техн. наук: 05.16.02 / Бойков Дмитрий Владимирович. – Новокузнецк, 2013. – 148 с.

61. Добужская А.Б. Изучение состава неметаллических включений в рельсах / А.Б. Добужская, Л.А. Смирнов, Н.В. Мухранов, М.С. Фомичев, Е.В. Белокурова // Сталь. – 2015. – № 7. – С. 82-86.

62. Григорович К.В. Влияние технологии выплавки на чистоту стали по неметаллическим включениям / К.В. Григорович, С.В. Шибаев // Неметаллические включения в рельсовой стали : сб. науч. тр., Екатеринбург : УИМ. – 2005. – С. 74-86.

63. Поляков, В. В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов / В.В. Поляков, А.В. Великанов. – Москва : Металлургия, 1990. – 416 с.

64. Влияние кальция на загрязненность и морфологию неметаллических включений в рельсовой стали / В. В. Могильный // Неметаллические включения в рельсовой стали : сборник научных трудов по материалам I Всероссийского научно-технического семинара / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2005. – С. 59–64.

65. Оценка склонности рельсов к образованию контактно-усталостных дефектов / В.В. Павлов, Л.В. Корнева, Е.В. Полевой, К.В. Волков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Московская обл., 23–25 октября 2012 г. – Екатеринбург, 2013. – С. 106–112.

66. Григорович К.В. Неметаллические включения: оценка и прогноз

эксплуатационной стойкости рельсов / К.В. Григорович, А.М. Арсенкин, А.С. Трушников // Неметаллические включения в рельсовой стали : сб. науч. тр., Екатеринбург : УИМ. – 2005. – С. 102-115.

67. Добужская А.Б. Исследование состава и источников поступления неметаллических включений, вызывающих образование контактно-усталостных дефектов в рельсах производства нижнетагильского металлургического комбината / А.Б. Добужская, А.А. Дерябин, В.Е. Семенов, В.А. Рейхарт // Бюллетень «Черная металлургия». – 2006. – № 10. – С. 33-36.

68. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha, S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9. №6. pp. 700-709.

69. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of Plastic Inclusions in U71Mn High-Speed Heavy-Rail Steel Refined by CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO Slag // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2019.Vol. 50. №1. pp. 459-470.

70. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer Simulation of Microsegregation of Sulphur and Manganese and Formation of MnS Inclusions while Casting Rail Steel // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61. №4. pp. 1939-1944.

71. ZHAO, K.-w., ZENG, J.-h., WANG, X.-h. Nonmetallic Inclusion Control of 350 km/h High Speed Rail Steel // Journal of Iron and Steel Research International. 2009. Vol. 16. №3. pp. 20-26.

72. Исследование неметаллических включений в различных зонах кристаллизации рельсовой стали марки Э90ХАФ / Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Уманский А.А., Головатенко А.В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 135-142.

73. Житенев, А. И. Неметаллические включения в непрерывнолитой сортовой заготовке для рельсов и колес / А. И. Житенев, А. А. Казаков // Вектор науки ТГУ. – 2013. – №3. – С. 174-177.

74. Влияние модифицирования РЗМ на формирование неметаллических

включений в высокоуглеродистых сталях / Смирнов Л. А., Ровнушкин В. А., Добужская А. Б. [и др.] // Сталь. – 2016. – №11. – С. 21-28.

75. Колосова, Э. Л. Исследование природы неметаллических включений в рельсовой стали, раскисленной FeSiCa и SiZr / Э. Л. Колосова, В. И. Сырейщикова, В. А. Минеева // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – №12. – С. 56-58.

76. Раскисление рельсовой стали сплавами, содержащими Cu, Zr, Al / Дерябин А. А., Семенов В. Е., Топычанов Б. И. [и др.] // Бюл. Черная металлургия. – 1986. – №17. – С. 47-48.

77. Разработка комплексных сплавов и технологии их применения раскисления и модифицирования стали. / Мелеков В. А., Прокопенко С. А., Паляничка В. А., Висторовский Н. Т. // Тематический сборник научных трудов «Производство стали в конвертерных и мартеновских печах», М., 1988. – С. 86-88.

78. Снижение загрязненности рельсов строчечными включениями при раскислении стали алюмобарием. / Дерябин А. А., Колосова Э. Л., Сырейщикова В. И. [и др.] // Бюл. "Черная металлургия". – 1981. – №15. – С. 57-58.

79. Раскисление рельсовой стали комплексными сплавами. / Ткаченко А. И., Критинин И. А., Жидков В. Д. [и др.] // Бюл. НТИ "Черная металлургия". – 1981. – №17. – С. 60-61.

80. Качество и служебные свойства рельсов из стали, раскисленной сплавами с Al и Ca. / Великанов А. В., Рейнхарт В. А., Добужская А. Б. [и др.] // Сборник «Повышение эффективности и надежности рельсов». – М.: 1990. – С.40-53.

81. Окислительные процессы при продувке стали инертным газом в ковше / Гизатулин Р. А., Нохрина О. И., Дмитриенко В. И., Сулимова И. С. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 20-22.

82. Бахметьев, В. В. Повышение эксплуатационных свойств отливок путем рафинирования и модифицирования расплавов сталей / Бахметьев В. В., Колокольцев В. М. // Вестник Магнитогорского государственного технического

университета им. Г.И. Носова. – 2006. – № 4 (16). – С. 34-40.

83. Обработка стали в ковше инертным газом и акустическая продувка / Лисиенко В.Г., Дегай А.С., Кащеев И.Д. [и др.] // Новые огнеупоры. – 2007. – № 7. – С. 12-17.

84. Кудрин, В. А. Внепечная обработка чугуна и стали / В. А. Кудрин. – М.: Металлургия. 1992. – 336 с.

85. Живченко, В. С. Гомогенизация и рафинирование стали продувкой аргоном в шлейфовом мелкопузырьковом режиме / В. С. Живченко, С. А. Фролова, А. И. Троцан // Черная металлургия. – Бюл. научно-технич. и эконом. информации. – Москва. – 2008. – Вып. 2 (1298). – С. 70-75.

86. Чуманов, В. И. К вопросу оптимизации режима продувки металлического расплава инертным газом / В. И. Чуманов, В. Ю. Хартов, И. В. Чуманов // Электрометаллургия. – 2011. – № 12. – С. 25-28.

87. Результаты импульсной продувки жидкой стали в ковше нейтральным газом / Шумахер Э.Э., Семеняк М.Ю., Бойченко Б.М., Смоктий В.В., Порохнявый В.Г. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2011. – № 3 (1335). – С. 45-48.

88. Опыт внедрения технологии поочередной импульсной продувки металла в сталеразливочных ковшах на Белорусском металлургическом заводе / Шумахер Э.Э., Семеняк М.Ю., Смоктий В.В., Порохнявый В.Г., Зазян А.С. // Металлург. – 2012. – № 8. – С. 39-42.

89. Чичкарев, Е. А. Моделирование процессов коагуляции и удаления неметаллических включений при продувке расплава инертным газом / Е. А. Чичкарев // Металлург. – 2010. – № 4. – С. 67-71.

90. Смирнов, А. Н. Исследование процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом // А.Н. Смирнов, С.Г. Жемеров, Д. А. Фоменко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2011. – № 8 (1340). – С. 58-62.

91. Моделирование гидродинамики расплава в ковше при комбинированной продувке через верхнюю фурму и газопроницаемую вставку / Гизатулин Р. А.,

Протопопов Е. В., Самохвалов О. С., Самохвалов С. Е. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2004. – № 12. – С. 9-12.

92. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 3. / Смирнов А. Н., Ошовская Е. В., Сафонов В. М., Писмарев К. Е. // Процессы литья. – 2009. – № 5. – С. 11.

93. Смирнов, Н. А. Рафинирование стали вдуванием порошкообразных материалов / Н. А. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 33-42.

94. Смирнов, Н. А. Оптимизация технологии десульфурации стали в агрегате ковш-печь / Н. А. Смирнов // Электрометаллургия. – 2004. – № 1. – С. 20-28.

95. Смирнов, Н. А. Рафинирование стали продувкой порошками в печи и ковше / Н. А. Смирнов, В. А. Кудрин. – М.: Металлургия, 1986. – 186 с.

96. Применение порошкообразных реагентов для повышения качества электростали и интенсификации плавки / Смирнов Н. А., Кудрин В. А., Сидоренко М.Ф. [и др.] // Сталь. – 1980. – № 3. – С. 200–203.

97. Уманский, А. А. Исследование микроструктуры дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов / А.А. Уманский, А.С. Симачев, Л.В. Думова // Сборник статей VII Международной научно-практической конференции «Теория и практика современной науки». – Пенза: «Наука и Просвещение», 2022. – С. 140-143.

98. Особенности микроструктуры дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК" / Уманский А. А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Думова Л. В. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – № 6 (804). – С. 52-58.

99. Симачев, А. С. Исследование технологической пластичности непрерывно-литой заготовки рельсовой электростали и повышение эксплуатационных свойств рельсов на основе совершенствования технологии

термомеханической обработки: диссертация .... канд. техн. наук: 05.16.01 / Симачев Артем Сергеевич. – Новокузнецк, 2017. – 148 с.

100. Уманский, А. А. Исследование характерных дефектов дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов / А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова // В сборнике статей XVII Всероссийской научно-практической конференции «Результаты современных научных исследований и разработок». – Пенза: «Наука и Просвещение», 2022. – С. 73-76.

101. Природа внутренних дефектов железнодорожных рельсов производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК", выявляемых при ультразвуковом контроле в потоке стана / Уманский А. А., Головатенко А. В., Симачев А. С., Думова Л. В. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – № 6 (804). – С. 59-64.

102. Думова, Л. В. Анализ процессов формирования металлургического качества железнодорожных рельсов из электростали / Л. В. Думова, Е. В. Протопопов, А. А. Уманский // Вестник СибГИУ. – 2023. – №3. – С. 47-57.

103. Уманский, А. А. Развитие теоретических и технологических основ эффективного производства проката из рельсовых сталей на основе комплексного параметра оптимизации: диссертация .... докт. техн. наук: 2.6.4 / Уманский Александр Александрович. – Новокузнецк, 2022. – 295 с.

104. Думова, Л. В. Исследование влияния параметров продувки инертным газом при внепечной обработке рельсовой электростали на образование оксидных неметаллических включений / Л. В. Думова, А. А. Уманский // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Роль технических наук в развитии общества». – Кемерово: «Западно-Сибирский научный центр», 2017. С. 119-122.

105. Думова, Л. В. Анализ влияния параметров внепечной обработки рельсовой электростали на образование оксидных неметаллических включений / Л. В. Думова, А. А. Уманский // Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2017. С. 159-

106. Степанов, А. Т. Изучение механизма удаления неметаллических включений при продувке металла в ковше аргоном / А. Т. Степанов, Н. Н. Суворин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – №7. – С. 22-24.

107. Зависимость качества непрерывнолитой стали от содержания примесей цветных металлов / Троцан А. И., Карликова Я. П., Носоченко О. В., Бродецкий И. Л., Белов О.Ф. // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2008. Вып. 18. С. 71-75

108. Голубцов, В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. – Челябинск, 2006. – 423 с.

109. Величко, А. Г. Внепечная обработка стали / А. Г. Величко. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 198 с.

110. Математическая модель гидродинамических и тепломассобменных процессов в агрегате ковш – печь / Белоусов В.В., Бондаренко В.И., Недопекин Ф.В., Бодряга В.В. [и др.] / Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – №1 – С. 20-27.

111. Гизатулин, Р. А. Внепечные и ковшевые процессы обработки стали / Р. А. Гизатулин, В.И. Дмитриенко. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 181 с.

112. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг, С. Н. Маринцев. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003. – 300 с.

113. Перемешивание расплава при продувке инертным газом в агрегатах ковш-печь / Протопопов Е. В., Думова Л. В., Темлянцев М. В., Запольская Е. М. // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение. – 2021. – Вып. 24. – С. 76-83.

114. Kai T // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1981. – V. 68, № 4. – P. 214.

115. Mori K., Sano M. // J. Iron and Steel Inst. Jap. – 1983. – V. 69, № 6. – P. 672- 695.

116. Явойский, В. И. Теории продувки сталеплавильной ванны / В. И. Явойский, Г. А. Дорофеев, И. Л. Повх. – М. : Metallurgia, 1974. – 496 с.

117. Охотский, В. Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В. Б. Охотский. – Москва : Металлургия, 1993. – 151 с.
118. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.
119. Охотский, В. Б. Гидродинамика процессов взаимодействия газовой струи с жидкостью / В. Б. Охотский. – ИФЖ. – 1984. – Т. 47. – № 4. – С. 550-558.
120. Дюдкин, Д. А. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки стали / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. – Москва: Теплотехник, 2008. – 328 с.
121. Senuma T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets (Review) / T. Senuma // ISIJ International. – 2001. – Vol. 41. – No. 6. – P. 520-532.
122. Поляков, В. В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов / В. В. Поляков, А. В. Великанов. – Москва: Металлургия, 1990. – 416 с.
123. Nonmetallic LD slag fines – opportunities by invoking chemistry / S. Ashrit, S. Sarkar, R. V. Chatti, C. Sarkar, S. Sarkar // Ironmaking and Steelmaking. – 2020. – Vol. 47. – No. 8. – P. 903-907.
124. Tassot, P. Ways of improving steel quality in the tundish / P. Tassot, N. Reichert // Revue de Metallurgie. – 2010. – Vol. 107. – No. 5. – P. 175-185.
125. Effect of furnace gas composition on characteristics of supersonic oxygen jets in the converter steelmaking process / Yao L., Zhu R., Tang Y., Wei G., Dong K. // Materials. – 2020. – Vol. 13. – No. 15. Article 3353. <http://doi.org/10.3390/ma13153353>
126. Wilson, A. Clean steel technology – fundamental to the development of high performance steels. In: Advances in the Production and Use of Steel with Improved Internal Cleanliness / A. Wilson // J. Mahaney ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999. – P. 73-88.
127. High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications / R. L. Klueh, D.R. Harries [etc]. – PA: ASTM, 2001. – 90 p.

128. Simulation of gasliquid two-phase flow in metallurgical process / Wang B., Shen S., Ruan Y., Cheng S., Peng W., Zhang J. // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2020. – Vol. 56. – No. 4. – P. 619-632.

129. Численные исследования параметров теплообмена при инъекционной подаче порошков в расплав рельсовой стали в агрегате ковш – печь / Протопопов Е. В., Думова Л. В., Ноздрин И. В., Чернышева Н. А. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2022. – Т. 65. – № 10. – С. 724-732.

130. Харлашин, П. С. Влияние концентрации порошка на параметры газовзвеси в соплах торкрет-фурмы / П.С. Харлашин, А. К. Харин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2011. – Т. 54. – №4. – С. 9-12.

131. Кузнецов, Ю. М. Газодинамика процессов вдувания порошков в жидкий металл / Ю. М. Кузнецов. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 159 с.

132. High Performance Steel and Titanium Castings. National Materials Advisor Board. Vol. 296 of Report NMAB-296. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering, 2008. – 144 p.

133. Харлашин, П. С. Моделирование течения газовзвеси в торкрет-фурме при различной концентрации порошка / П. С. Харлашин, Н. О. Чемерис // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – №1. – С. 107-109.

134. Поживанов, М. А. Влияние диаметра частиц на дисперсное течение в фурме для инъекционной продувки. Сообщение 1 / М. А. Поживанов // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2005. – Т. 48. – №7. – С. 20-24.

135. Numerical analysis of the particle-induced effect on gas flow in a supersonic powder-laden oxygen jet / Li M., Li L., Zhang B., Li Q., Wu W., Zou Z. // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2020. – Vol. 51. – No. 4. – P. 17181730.

136. Manning, C. P. Emerging technologies of iron and steelmaking / C. P. Manning, R. J. Fruehan // *JOM*. – 2001. – Vol. 53. – No. 10. – P. 36-43.

137. High Performance Steel and Titanium Castings. National Materials Advisory Board. Report NMAB-296. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering. 1973. – 155 p.

138. Кудрин, В. А. Технология получения качественной стали / В. А. Кудрин, В. М. Парма. – Москва: Металлургия, 1984.

139. Сухомел, А. С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газовзвеси в трубах / А. С. Сухомел, Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов. – Москва: Энергоатомиздат, 1977. – 192 с.

140. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление / С. С. Кутателадзе. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

141. Совершенствование внепечной обработки рельсовой стали на агрегате "ковш-печь" с целью повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов / Уманский А. А., Козырев Н. А., Бойков Д. В., Думова Л. В. // Труды XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2017. С. 44-48.

142. Improvement of the extra-furnace rail steel processing on the "ladle-furnace" unit in order to increase the operational stability of railway rails / Umansky A.A., Kozyrev N.A., Dumova L.V., Boykov D.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1).  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012078>

143. Думова, Л. В. Исследование и совершенствование режимов продувки расплава рельсовой электростали в процессе обработки на агрегате «ковш-печь» / Л. В. Думова, Е. В. Протопопов, А. А. Уманский // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – №2. – С. 127-135.

144. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям / Григорьев А. М., Кузнецов М. С., Шепелев Д. С., Алексеев Е. М., Григорович К. В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 5. – С. 345-352.

145. Взаимодействие расплава рельсовой стали с огнеупорной футеровкой / Григорьев А. М., Григорович К. В., Ем А. Ю., Морозов А. О. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 484-487.

146. Думова, Л. В. Обоснование технико-экономической эффективности применения новых видов ферросплавов для раскисления рельсовой электростали / Л. В. Думова, А. А. Уманский // Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2017. С. 164-167.

147. Umansky A.A. A study on the influence of the ratio of pig iron and metal scrap in the of electric melting charge on the technical and economic performances of the rail steel production / A.A. Umansky, L.V. Dumova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012077>

148. Протопопов, Е. В. Оптимизация состава металлозавалки при выплавке рельсовой электростали с целью повышения технико-экономических показателей ее производства / Е. В. Протопопов, Л. В. Думова // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2021. – № 24. – С. 93-102.

149. Думова, Л. В. Исследование влияния параметров металлозавалки на технико-экономические показатели производства электростали / Л. В. Думова, А. А. Уманский // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Роль технических наук в развитии общества». – Кемерово: «Западно-Сибирский научный центр», 2017. С. 131-134.

150. Уманский, А. А. Исследование влияния соотношения чугуна и металлического лома в шихте электроплавки на технико-экономические показатели производства рельсовой стали / А. А. Уманский, Л. В. Думова // Труды XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2017. С. 18-23.

151. Уманский, А. А. Анализ взаимосвязи состава металлошихты электроплавки с основными технико-экономическими показателями выплавки рельсовой стали / А. А. Уманский, Н. А. Козырев, Л. В. Думова // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 3 (21). С. 24-28.

152. Думова, Л. В. Разработка модели прогнозирования технико-экономических показателей работы дуговой электропечи при изменяющемся составе металлозавалки / Л. В. Думова // Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых» – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2016. С. 184-187.

153. Уманский, А. А. Исследование комплексного влияния параметров выплавки рельсовой электростали на качество рельсовой продукции и технико-экономические показатели ее производства / А. А. Уманский, Л. В. Думова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 876-883.

154. Уманский, А. А. Анализ и моделирование изменения технико-экономических показателей производства электростали рельсовых марок в зависимости от состава исходной металлозавалки / А. А. Уманский, Н. А. Козырев, Л. В. Думова // В сборнике XV Международного конгресса сталеплавателей. – Тула: «РПК ПринтАП», 2018. – С. 563-568.



Утверждаю:  
Технический директор  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Р.Н. Молоканов

« 22 » 11 2023 г.

**Акт внедрения в производство результатов  
кандидатской диссертации ведущего инженера  
ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ»  
Думовой Любови Валерьевны**

В период с 2017 г. по 2022 г. при участии ведущего инженера ФГБОУ ВО «СибГИУ» Думовой Любови Валерьевны проведен комплекс научно-исследовательских работ, направленных на повышение качества рельсовой стали и технико-экономических показателей ее производства в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

На основании результатов проведенных исследований определены закономерности влияния технологических параметров производства рельсовой стали на формирование дефектов непрерывнолитых заготовок и дефектов рельсов металлургического происхождения. Полученные закономерности явились базой для разработки:

- новой схемы внепечной обработки рельсовой стали, использование которой привело к повышению качества рельсовой стали и готовых рельсов без снижения производительности цеха (ожидаемый экономический эффект, полученный за счет снижения отбраковки рельсов на 0,5%, составит 15 млн. руб/год при долевом участии Думовой Л.В. – 25%);

- нового режима раскисления рельсовой стали на выпуске из печи, применение которого обусловило уменьшение отбраковки рельсов из-за наличия глиноземистых неметаллических включений на 0,4% и снижение затрат на раскисление стали на 14 руб/т (ожидаемый экономический эффект составит 23 млн. руб/год при долевом участии Думовой Л.В. – 20%).

По результатам исследований влияния состава металлозавалки на удельные расходы сырья, материалов и энергоносителей, а также на производительность дуговой электропечи при выплавке рельсовой стали разработана модель прогнозирования технико-экономических показателей производства рельсовой стали при варьировании доли чугуна в металлошихте. Указанная модель применяется при определении оптимального соотношения чугуна и лома в металлозавалке в зависимости от текущего уровня цен на материалы и энергоносители, используемые при электроплавке и с учетом требуемой производительности дуговой электропечи.

Настоящий документ составлен для констатации научной и технологической новизны проведенных исследований и не является основанием для финансовых претензий.

Начальник научно-исследовательского  
отдела рельсового производства, к.т.н.

Е.В. Полевой

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»



УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по учебной работе  
к.т.н., доцент

Е.С. Корнев  
«16» 01 2024 г.

### Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Думовой Любови Валерьевны «Разработка и совершенствование ресурсосберегающей технологии выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали повышенного качества» внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и используются при проведении лекционных и практических занятий по следующим дисциплинам: «Инновационные технологии повышения качества стали», «Высокие технологии в металлургии», «Современные научно-технические проблемы технологических процессов», «Энерго- и ресурсосбережение в металлургическом производстве».

Заведующий кафедрой металлургии  
черных металлов и химической технологии,  
к.т.н., доцент

С.В. Фейлер

Начальник Управления образовательной  
деятельности и информационно-аналитического  
мониторинга,  
к.э.н., доцент

Е.В. Иванова