

На правах рукописи



Думова Любовь Валерьевна

**Разработка и совершенствование ресурсосберегающей
технологии выплавки и внепечной обработки рельсовой
электростали повышенного качества**

Специальность: 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Протопопов Евгений Валентинович

Новокузнецк, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Протопопов Евгений Валентинович
Официальные оппоненты:	Шешуков Олег Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» Комолова Ольга Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук»
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск


Защита состоится «26» ноября 2024 г. в 10-00 в ауд. 3П на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ.

факс: (3843) 46-57-92; e-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» www.sibsiu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.401.01,
д.т.н., доцент



Уманский Александр
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 расширяет возможности 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.

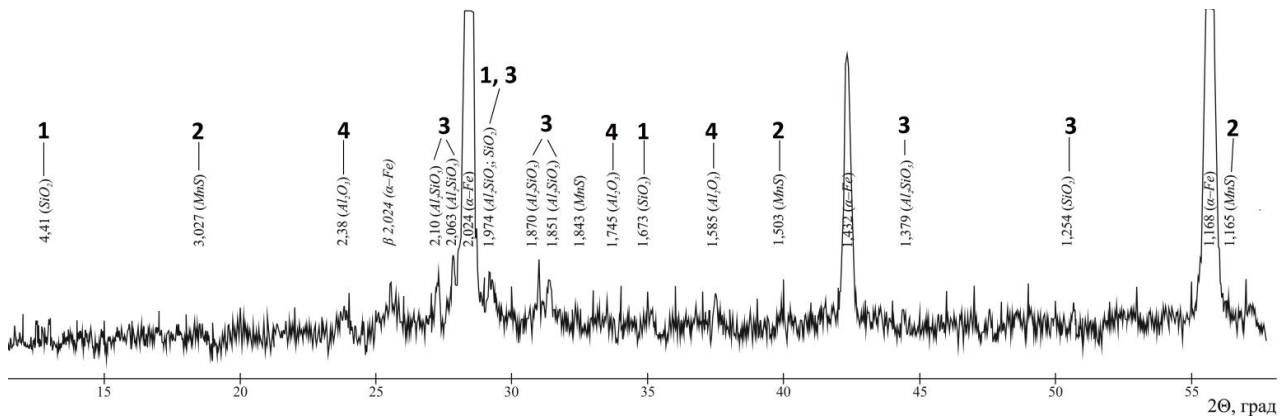
Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 30 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 154 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния теории и технологии производства рельсовой стали, в том числе проанализирована эволюция химического состава и требований к качеству рельсовых сталей за весь период их массового производства, приведено описание современных и перспективных технологических решений по повышению качества рельсовых сталей. По результатам проведенного анализа сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследований процессов формирования качества непрерывнолитых заготовок и металлургического качества рельсов на различных технологических стадиях производства рельсовой стали. На первом этапе, 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». В качестве объектов исследования использовали рельсы и исходные непрерывнолитые заготовки 50-ти плавок указанной стали. Определено, что преобладающей (в 95% случаев) причиной отбраковки рельсов являются расслоения в шейке рельсовых профилей (соответствует центральной зоне исходных непрерывнолитых заготовок) длиной до 2 мм со скоплениями неметаллических включений. При этом указанные неметаллические включения преимущественно представляют собой силикаты алюминия, оксиды кремния и алюминия,

сульфиды марганца (рисунок 1).



1 – SiO_2 ; 2 – MnS ; 3 – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; 4 – Al_2O_3

Рисунок 1 – Рентгенограмма области расслоения в шейке рельса стали Э76ХФ

С использованием метода электронной микроскопии подтверждено, что вышеперечисленные типы неметаллических включений являются характерными для центральной зоны непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ (рисунок 2).

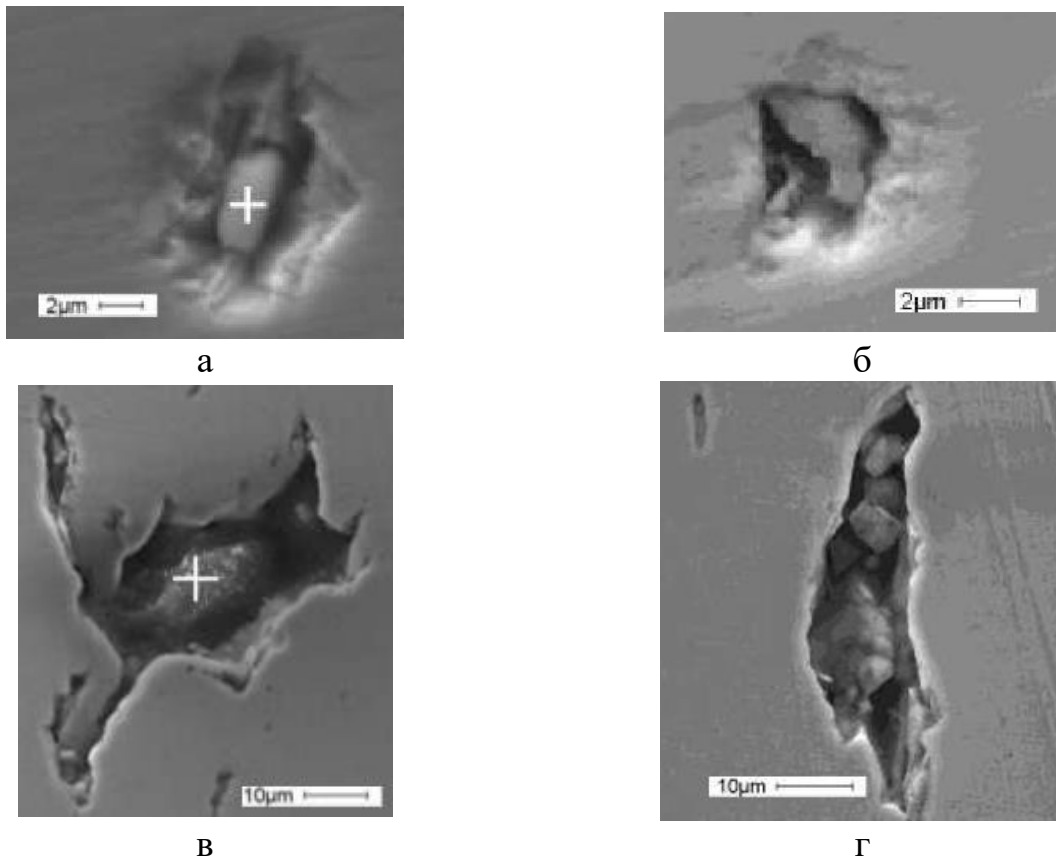


Рисунок 2 – Характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали Э76ХФ: а – MnS ; б – SiO_2 ; в – Al_2O_3 ; г – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$

На втором этапе с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа исследовано влияние параметров выплавки и внепечной

обработки рельсовой стали на отбраковку рельсов из-за наличия внутренних дефектов. Исследования проводили путем анализа выборки из 100 плавок рельсовой стали марки Э76ХФ производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

По результатам статистического анализа определено, 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:

$$Br = -9,1 + 0,016[O] - 0,088 \cdot D_{пр} - 0,122 \cdot I_{пр} + 726,4[S] + 472,6[P] + 27[Cu] + 464,3[Sn], \quad (1)$$
 где Br – отбраковка рельсов, %; $[O]$ – окисленность стали на выпуске из печи в ковш, %; $D_{пр}$ – длительность продувки инертным газом на АКП, мин.; $I_{пр}$ – интенсивность продувки инертным газом на АКП, $m^3/ч$; $[S]$, $[P]$, $[Cu]$, $[Sn]$ – содержание серы, фосфора, меди и олова в готовой стали, %.

Увеличение содержания кислорода в стали на выпуске из печи повышает загрязненность стали первичными неметаллическими включениями (Al_2O_3 , SiO_2 , $Al_2O_3 \cdot SiO_2$), наличие скоплений которых приводит к образованию расслоений в рельсах. Повышение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом способствует более полному удалению неметаллических включений из металла в шлак, что снижает вероятность формирования скоплений неметаллических включений (рисунок 3) и, соответственно, уменьшает вероятность образования дефектов рельсов.

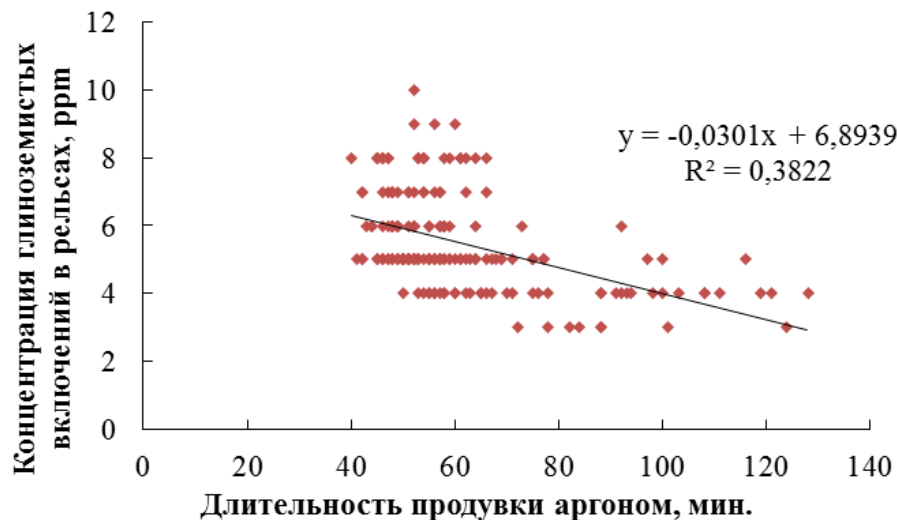


Рисунок 3 – Влияние продолжительности продувки рельсовой стали инертным газом в ковше на содержание неметаллических включений в рельсах

Необходимо отметить, что дополнительно проведенными металлографическими исследованиями проб жидкой стали после внепечной обработки и проб, отобранных от непрерывнолитых заготовок, подтверждено снижение загрязненности стали неметаллическими включениями при уменьшении окисленности стали совместно с увеличением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в сталеразливочном ковше.

Повышение содержания серы в рельсовой стали способствует

формированию крупных включений MnS или их скоплений в процессе кристаллизации стали. При этом за счет различных коэффициентов температурного расширения указанных включений и основного металла в процессе затвердевания по их границам формируются пустоты, которые при производстве рельсов не завариваются вследствие различной пластичности включений и металлической матрицы. Механизм отрицательного влияния повышенного содержания меди и олова на формирование дефектов рельсов заключается в увеличении вероятности образования трещин за счет снижения горячей пластичности стали. Влияние повышенного содержания фосфора на вероятность образования дефектов также связано со снижением пластичности стали и обусловлено скоплениями мелких включений фосфидов по границам зерен металла.

В третьей главе с целью обоснования оптимальных режимов внепечной обработки рельсовой стали, обеспечивающих повышение металлургического качества рельсов, выполнено моделирование процессов продувки расплава рельсовой стали инертным газом через донные фурмы и вдувания порошковых реагентов в потоке газа-носителя с использованием погружной фурмы.

При проведении аналитических исследований влияния интенсивности продувки расплава в сталеразливочном ковше инертным газом на показатели, характеризующие интенсивность перемешивания расплава, в качестве исходной и сравнительной информации использованы ранее полученные данные и результаты низкотемпературного моделирования.

Мощность перемешивания определяли с использованием положений и законов сохранения энергии и количества движения:

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

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

l_i – «масштаб движения», равный 1/3 размера всплывающих пузырей, м.

В соответствии с используемой моделью эффективный коэффициент диффузии определяли по выражению:

$$D_{\varepsilon} = \frac{\rho_m \cdot g \cdot V_{\Gamma} \cdot h_B \cdot \frac{\sqrt{S}}{m}}{w_{\text{вспл}} \cdot Q} \quad (3)$$

где ρ_m – плотность металла, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²;

V_{Γ} – объемный расход инертного газа, м³/с; h_B – высота металла в ковше, м;

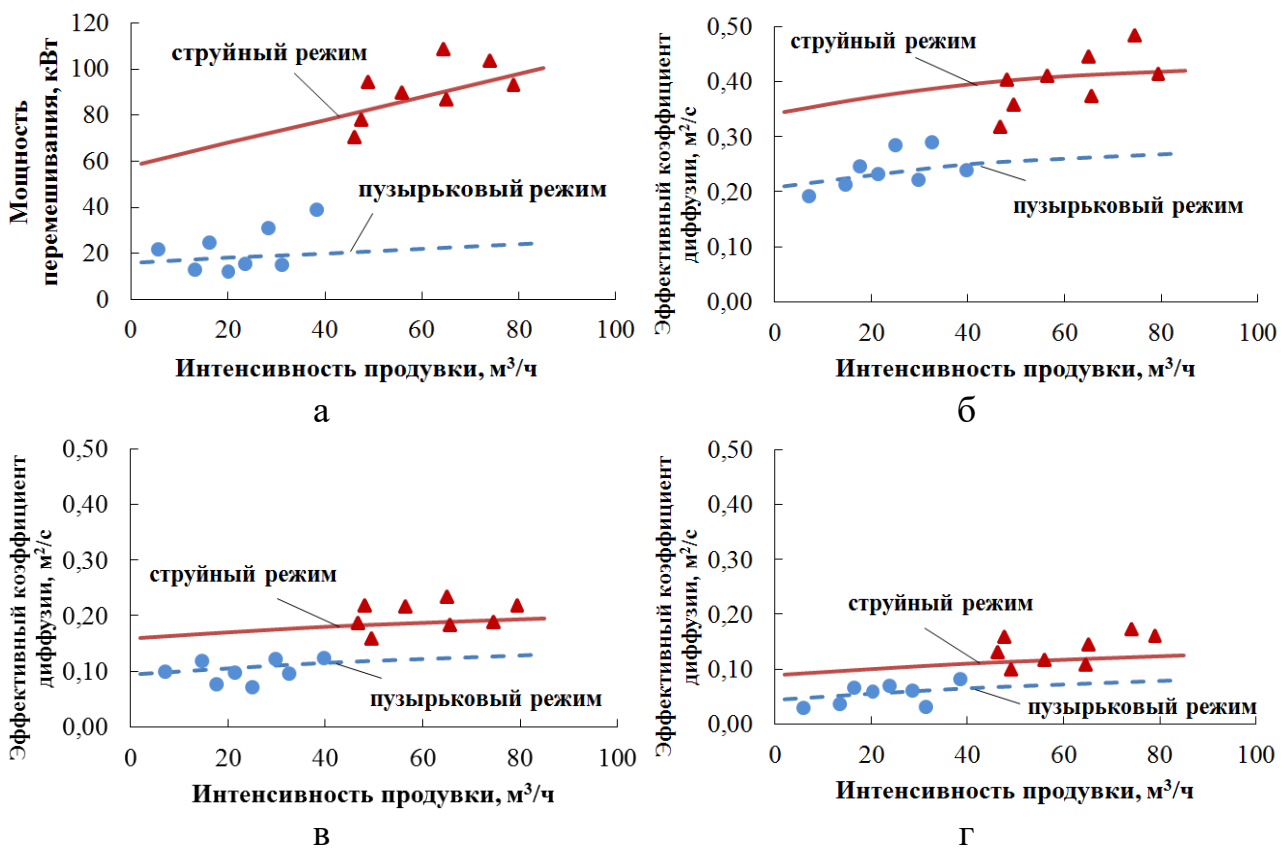
S – площадь поверхности ванны в спокойном состоянии, м²; m – количество донных пористых пробок; $w_{\text{вспл}}$ – скорость всплытия газовых пузырей, м/с;

Q – масса металла в ковше, кг.

На рисунке 4 представлены результаты исследований применительно к двум характерным режимам истечения газовых струй – пузырьковому и струйному. Фиксируемые режимы истечения газовых струй имеют место при определенных скоростях подачи инертного газа в моделях сталеразливочного ковша. Численные значения диапазонов переходных режимов истечения газовых струй при анализе не учитывали. Характеристиками частоты

пульсации и угла раскрытия струи пренебрегали.

В соответствии с полученными результатами при повышении интенсивности продувки металла в ковше инертным газом происходит практически линейное увеличение мощности перемешивания вне зависимости от характерных режимов истечения газовых струй (рисунок 4 а). Абсолютные значения показателей мощности перемешивания для условий струйного режима истечения газовых струй значительно (в 3,6-4,0 раза) превышают данный показатель для условий пузырькового режима истечения; при этом наблюдается более интенсивный рост мощности перемешивания с увеличением интенсивности продувки. Выполненные расчеты свидетельствуют, что увеличение интенсивности продувки обуславливает рост коэффициента эффективной диффузии по нелинейному закону во всех направлениях переноса и вне зависимости от режима истечения газовых струй (рисунки 4 б-г). При этом наибольшие абсолютные значения коэффициента эффективной диффузии имеют место для случая вертикального переноса (рисунок 4 б), а наименьшие – для радиального переноса (рисунок 4 г).



- – пузырьковый режим истечения газовых струй (скорость < 30 м/с)
- ▲ – струйный режим истечения газовых струй (скорость 80-150 м/с)

Рисунок 4 – Зависимость мощности перемешивания расплава (а) и значений коэффициента эффективной диффузии для вертикального (б), горизонтального (в) и радиального переноса (г) от интенсивности продувки инертным газом в сталеразливочном ковше

В относительном выражении разница коэффициентов эффективной

диффузии для случаев вертикального и радиального направлений переноса составляет от 3,4 до 4,7 раз, а для случаев вертикального и горизонтального переноса – в среднем 2,2 раза. Установлено (рисунок 4 б-г), что при струйном режиме истечения газовых струй массоперенос и перемешивание ванны проходит в 1,5-2,0 раза эффективнее по сравнению с пузырьковым режимом.

С целью получения новой информации и определения оптимальных параметров технологии вдувания порошковых реагентов в потоке газа-носителя с использованием погружной фурмы при продувке расплава в ковше исследовали следующие показатели процесса: влияние температуры поверхности погружной фурмы на тепловой поток, передаваемый транспортирующему газу при изменении в широком диапазоне концентрации порошка и его плотности; влияние температуры несущего газа на основные характеристики газопорошкового течения, в том числе на коэффициент аэродинамического сопротивления, давление транспортирующего газа, разность скоростей фаз, эквивалентный диаметр и коэффициент формы частиц.

Численное моделирование газопорошковой продувки расплава рельсовой стали в сталеразливочном ковше базировалось на решении системы уравнений движения и теплообмена в погружной фурме, характеризующих газодинамический и теплообменный процессы в дисперсной среде с учетом их дополнения замыкающими алгебраическими соотношениями. По полученным данным наибольшее влияние на тепловой поток от стенки фурмы к транспортирующему газу оказывают следующие параметры в порядке убывания степени их воздействия (рисунок 5 а): температура стенки фурмы, концентрация порошка и плотность порошка. При этом азот по отношению к аргону при продувке и одинаковых значениях объемного расхода транспортирующего газа позволяет отвести от стенки фурмы более значительные тепловые потоки. Определено (рисунок 5 б-г), что при различном сочетании коэффициента формы частиц вдуваемого порошка, его концентрации и плотности порошка и нагреве газопорошкового потока до температур 500-600°C сила межфазного взаимодействия может отличаться до 10 раз.

Четвертая глава посвящена разработке и совершенствованию технологических режимов выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения металлургического качества рельсов и технико-экономических показателей производства.

Опираясь на полученные данные о влиянии параметров продувки расплава инертным газом при его ковшевой обработке на металлургическое качество производимых рельсов (регрессионное уравнение 1) и с учетом результатов дополнительно проведенных исследований усовершенствован режим продувки рельсовой стали аргонem при обработке на агрегате «ковш-печь».

Промышленными исследованиями установлено пороговое значение расхода инертного газа, превышение которого значимо влияет на уменьшение загрязненности рельсов неметаллическими включениями. Показано, что увеличение длительности периода продувки расплава рельсовой стали при обработке на агрегате «ковш-печь» с интенсивностью более 0,55 м³/мин (33

м³/ч) через каждую донную фурму обуславливает снижение отбраковки рельсов по дефектам металлургического происхождения.

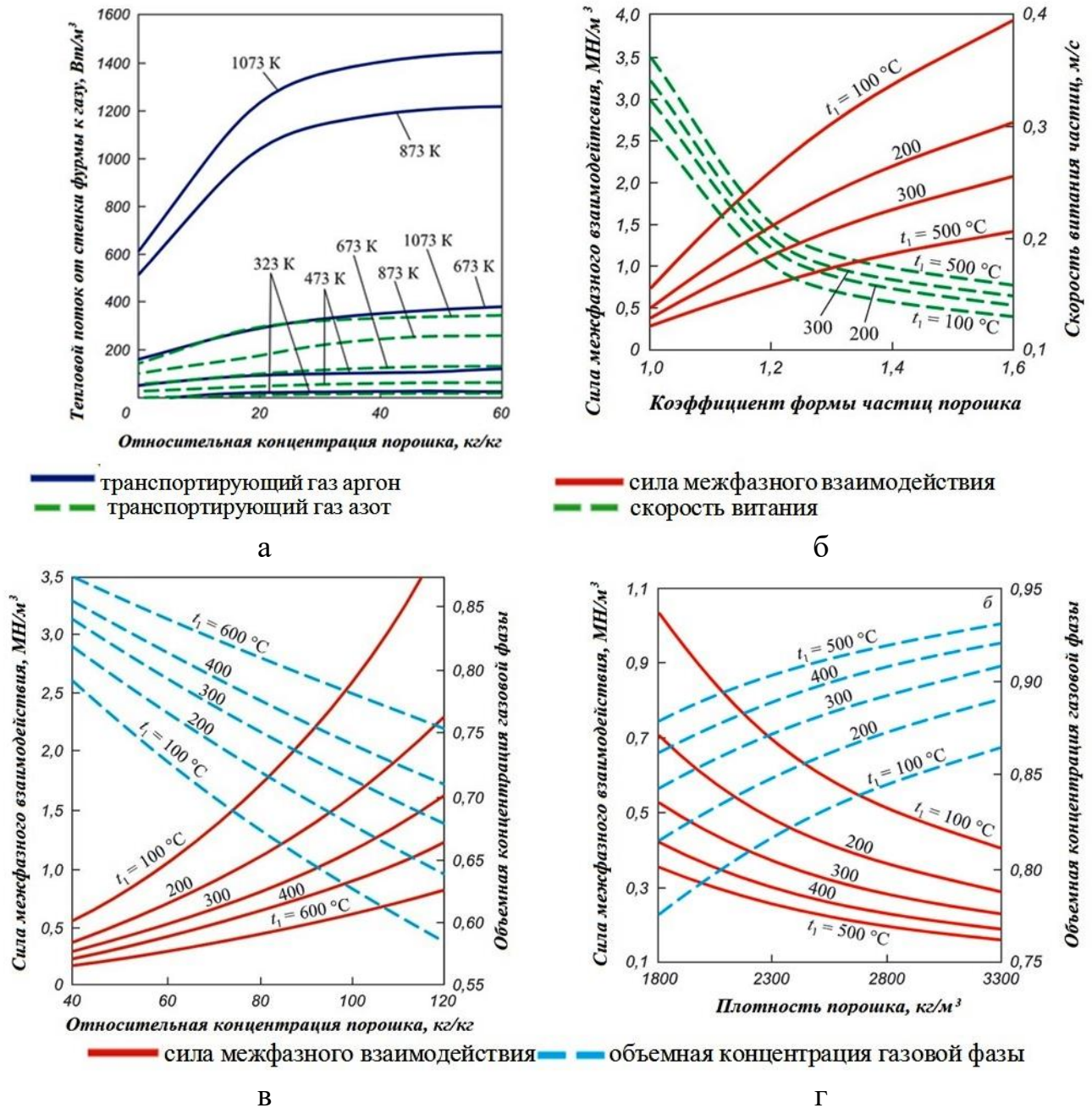


Рисунок 5 – Зависимость теплового потока от стенки фурмы к расплаву (а) и силы межфазного взаимодействия (б-г) от параметров газопорошковой продувки

С учетом технических и технологических ограничений работы основного оборудования рассматриваемого электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработан усовершенствованный режим продувки расплава аргоном на агрегате «ковш-печь» (рисунок 6). Отличительной особенностью указанного режима является наличие периода продолжительностью не менее 10 мин. (допускается также наличие двух периодов, продолжительностью 5 мин. каждый) с повышенным до значений 35-40 м³/мин расходом аргона через каждую донную фурму. 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, что подтверждено результатами опытно-промышленного опробования. Внедрение нового режима продувки рельсовой стали инертным газом в сталеразливочном ковше позволило снизить отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения на 0,5%, ожидаемый экономический эффект согласно Акту внедрения составляет 15 млн. руб/год при долевом участии автора – 25%.

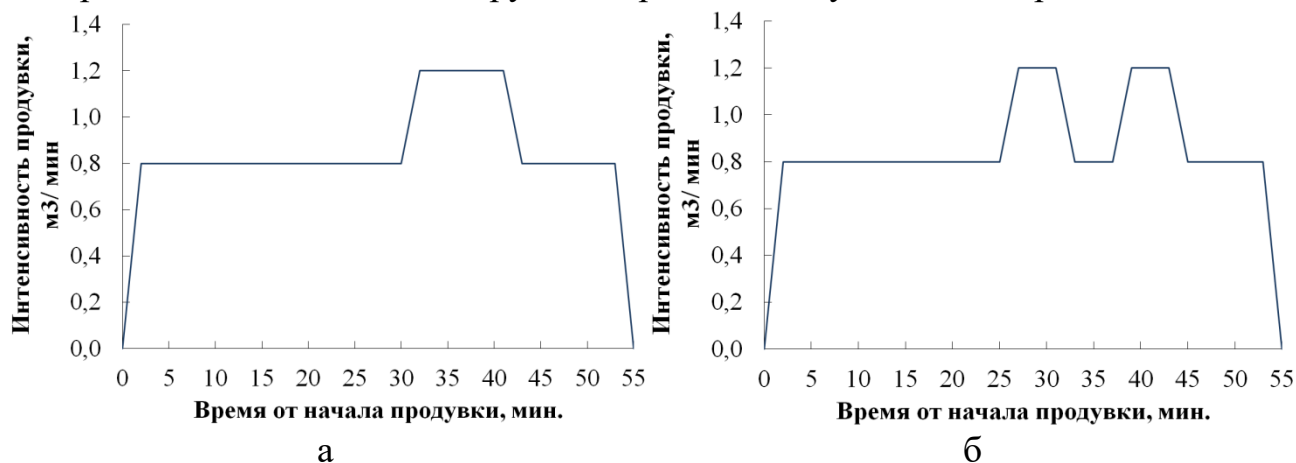


Рисунок 6 – Варианты усовершенствованного режима продувки расплава аргоном с одним (а) и двумя (б) периодами повышенной интенсивности вдувания газа

С целью снижения загрязненности рельсовой стали глиноземистыми неметаллическими включениями разработана, прошла опытно-промышленное опробование и внедрена технология раскисления рельсовой стали с использованием силикомарганца марки FeMnSi30HP взамен силикомарганца марки MnC18. Применение указанной технологии позволяет за счет снижения расхода ферросилиция, вносящего наибольшее количество алюминия в расплав при раскислении, уменьшить содержания алюминия в готовой рельсовой стали с 0,0029% до 0,0022%. При этом снижение расхода ферросилиция достигается за счет повышенного содержания кремния в силикомарганце FeMnSi30HP по сравнению с силикомарганцем MnC18. Результатом достигнутого уменьшения содержания алюминия в рельсовой стали явилось снижение загрязненности рельсов глиноземистыми неметаллическими включениями, что обусловило уменьшение отбраковки рельсов при ультразвуковом контроле их качества на 0,4%. Помимо указанного положительного эффекта при использовании новой технологии раскисления рельсовой стали зафиксировано увеличение степени сквозного усвоения углерода и кремния на 4% и 13 % соответственно за счет более глубокого раскисления стали на выпуске из печи; фактическое снижение затрат на раскисление составило 14 руб/т. Ожидаемая экономическая эффективность применения разработанной технологии раскисления рельсовой стали, подтвержденная Актом внедрения в АО «ЕВРАЗ ЗСМК», составляет 23 млн. руб. при долевом участии автора 20%.

С учетом установленного факта отсутствия значимого влияния соотношения чугуна и лома в металлозавалке на отбраковку рельсов по

внутренним дефектам определена целесообразность выбора оптимального состава металлошихты исходя из влияния состава металлозавалки на технико-экономические показатели выплавки стали (удельные расходы энергии, сырья и материалов, производительность дуговой электропечи). Для определения характера и степени указанного влияния проведены статистические исследования, где в качестве базы использовали массив из 500 плавов рельсовой стали марки Э76ХФ.

На основании проведенных исследований установлено, что при повышении доли чугуна в металлошихте удельный расход электроэнергии линейно снижается (рисунок 7 а), что обусловлено снижением затрат электроэнергии на расплавление за счет пониженной температуры плавления чугуна по сравнению с ломом. Согласно полученных данных при увеличении доли чугуна в металлозавалке удельный расход кислорода возрастает по параболическому закону (рисунок 7 б), что обусловлено необходимостью окисления дополнительного углерода, вносимого чугуном, в совокупности с увеличением интенсивности продувки кислородом для снижения продолжительности плавки. По полученным результатам увеличение доли чугуна в металлозавалке приводит к снижению содержания марганца на выпуске из дуговой печи (рисунок 7 в), что обусловлено совокупным влиянием пониженного содержания марганца в чугуне относительно лома и увеличением степени окисления марганца при интенсивной продувке кислородом.

Графическая зависимость, полученная на основе статистической обработки данных, свидетельствует о выраженном параболическом характере влияния доли чугуна в металлозавалке на длительность плавки (рисунок 7 г). На графике имеет место выраженный минимум, который соответствует доле чугуна в металлошихте 30-35 %. Полученный характер зависимости обусловлен разнонаправленным влиянием увеличения расхода чугуна на продолжительность отдельных периодов электроплавки при одновременном нелинейном изменении продолжительности самих периодов: снижение продолжительности периода плавления при одновременном нелинейном (за счет повышения интенсивности вдувания кислорода) увеличении длительности окислительного периода.

На основе полученных зависимостей разработана статистическая модель прогнозирования технико-экономических показателей производства рельсовой стали в зависимости от состава металлозавалки электроплавки. В указанной модели в качестве параметра оптимизации выступают суммарные затраты на шихтовые материалы (чугун и лом), электроэнергию, кислород, ферросплавы:

$$Z_{\text{СУМ}} = (P_{\text{ч}} \cdot C_{\text{ч}} + P_{\text{л}} \cdot C_{\text{л}} + P_{\text{э}} \cdot C_{\text{э}} + P_{\text{к}} \cdot C_{\text{к}} + P_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}}) \quad (4)$$

где $P_{\text{ч}}$, $P_{\text{л}}$, $P_{\text{э}}$, $P_{\text{к}}$, $P_{\text{ф}}$ – удельные расходы чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно; $C_{\text{ч}}$, $C_{\text{л}}$, $C_{\text{э}}$, $C_{\text{к}}$, $C_{\text{ф}}$ – цена чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно.

Расход марганецсодержащих ферросплавов обратно пропорционален содержанию марганца на выпуске из печи и определяется с учетом содержания марганца в ферросплаве и его угаром.

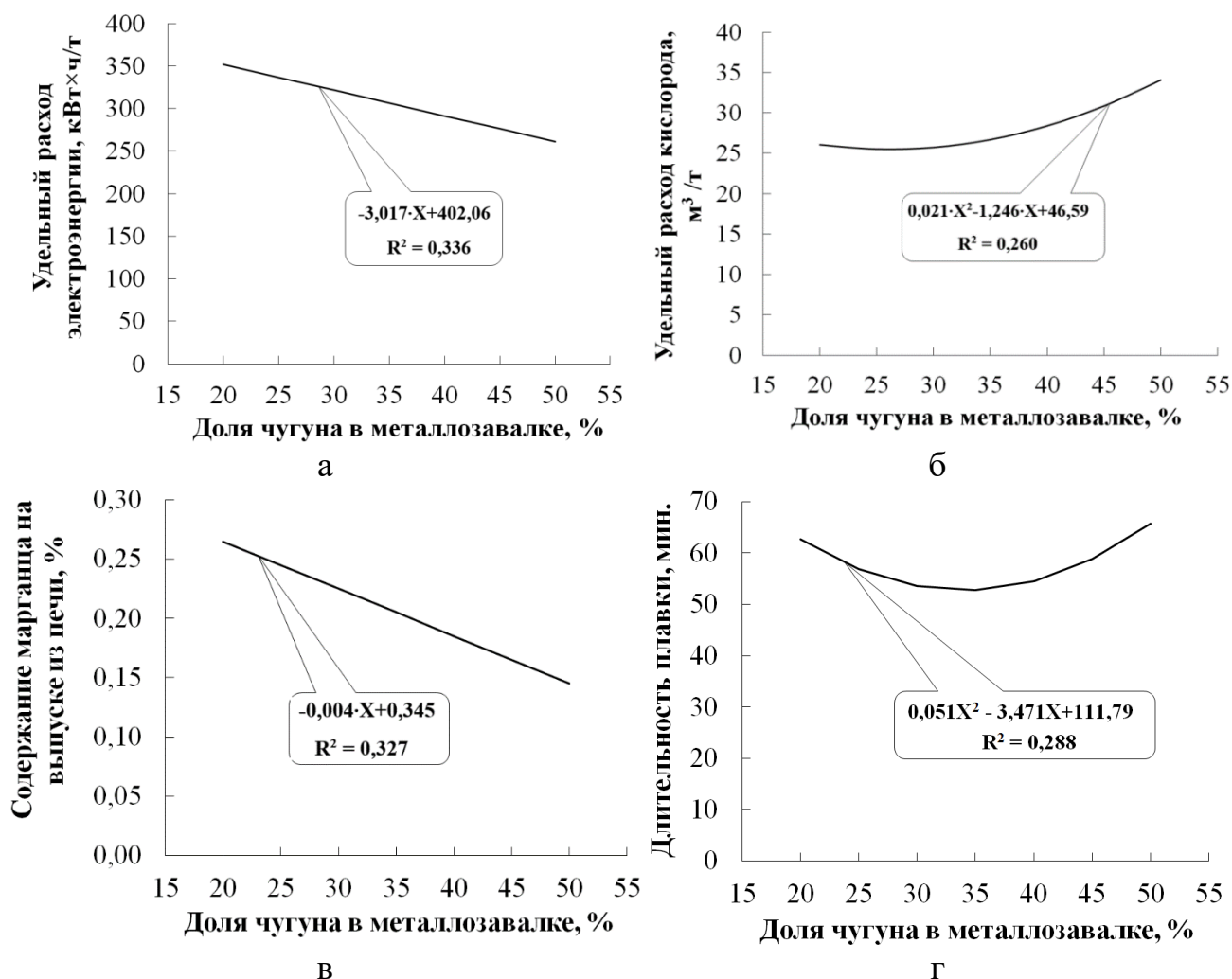


Рисунок 7 – Влияние доли чугуна в металлозавалке электроплавки рельсовой стали на удельные расходы электроэнергии (а), кислорода (б), содержание марганца на выпуске из печи (в) и цикл плавки (г)

Модель реализована в программе «EXCEL». Исходные данные вводятся в специальное «окно», результаты расчетов представляются в графическом виде (рисунок 8 а, б).

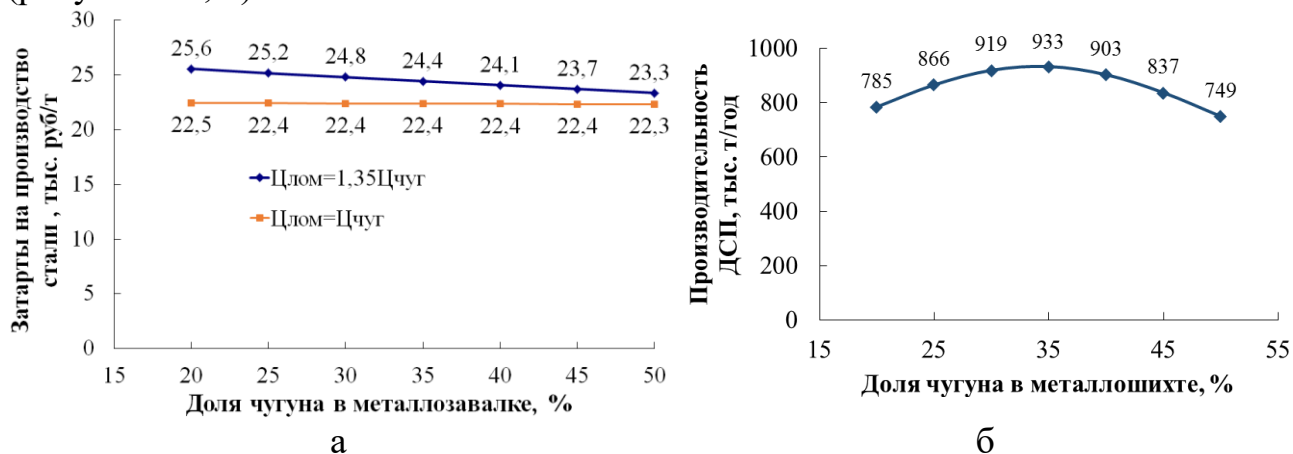


Рисунок 8 – Результаты прогнозных расчетов затрат на производство рельсовой стали (а) и производительности дуговой электропечи (б), проведенных с применением разработанной статистической модели

Разработанная модель применяется для оптимизации соотношения чугуна и лома в металлозавалке 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 м³/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.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. **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.

2. **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.

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

4. Исследование влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф на сопротивление пластической деформации / А. А. Уманский, М. В. Темлянцев, А. С. Симачев, **Л. В. Думова** // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2020. – № 2. – С. 32-37.

5. 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.

Статьи в зарубежных изданиях (из списка Scopus, Web of Science):

6. Nature Detection of Internal Defects in Railroad Rails Produced by EVRAZ ZSMK Company Using Ultrasonic Control in Mill Flow / / A.A. Umanskii, A. S. Simachev, A. V. Golovatenko, **L. V. Dumova** // Metal Science and Heat Treatment. – 2022. – Vol. 64. №5-6. – P. 350-354.

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

7. The Microstructure of Differentially Heat Strengthened Railroad Rails Manufactured by the EVRAZ ZSMK Company / A.A. Umanskii, A. V. Golovatenko, A. S. Simachev, **L. V. Dumova** // Metal Science and Heat Treatment. – 2022. – Vol. 64. №5-6. – P. 343-349.

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

8. 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>

9. Improvement of the extra-furnace rail steel processing on the "ladle-furnace" unit in order to increase the operational stability of railway rails / A. A. Umansky, N. A. Kozyrev, **L. V. Dumova**, D. V. Boykov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 411 (1).

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/411/1/012078>

Публикации в журналах и сборниках трудов:

10. **Думова, Л. В.** Анализ целесообразности применения железа прямого восстановления при выплавке рельсовой электростали / **Л. В. Думова** // Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2022. – С. 387-391.

11. 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.

12. 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.

13. Перемешивание расплава при продувке инертным газом в агрегатах ковш-печь / Е. В. Протопопов, **Л. В. Думова**, М. В. Темлянцев, Е. М. Запольская // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2021. – № 24. – С. 76-83.

14. 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.

15. 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.

16. **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.

17. **Думова, Л. В.** Анализ влияния химического состава хромистой рельсовой стали на качество поверхности рельсов / **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. 122-125.

18. **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.

19. **Думова, Л. В.** Исследование влияния химического состава рельсовой стали Э78ХСФ на образование поверхностных дефектов рельсов при их производстве / **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. 138-140.

20. **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. 159-162.

21. **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.

22. 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.

23. Уманский, А. А. Анализ влияния химического состава рельсовой электростали на качественные показатели железнодорожных рельсов / А. А. Уманский, **Л. В. Думова** // Труды XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2017. – С. 39-43.

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

25. 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.

26. **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.

Подписано в печать 2024. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в Издательском центре СибГИУ

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н,
ул. Кирова, зд. 42