

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Думовой Любови Валерьевны **«Разработка и совершенствование ресурсосберегающей технологии выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали повышенного качества»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallurgy черных, цветных и редких металлов

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.

### *Актуальность работы.*

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.

С учетом того факта, что порядка 70 % рельсовых сталей в России на сегодняшний день выплавляется в дуговых электропечах, можно сделать вывод, представленная диссертационная работа, посвященная научному обоснованию и разработке технологических решений по повышению качества рельсовых сталей и оптимизации технико-экономических показателей ее производства, несомненно, **является актуальной.**

**К научной новизне** диссертационной работы следует отнести следующее:

1. Определены и научно обоснованы закономерности формирования характерных внут-

ренных дефектов рельсов металлургического происхождения при их производстве из электро-стали, 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 Metallurgy.

Достоверность полученных результатов обоснована тем, что 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».

*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.

*В введении и первой главе* представлены результаты анализа современного состояния теории и технологии производства рельсовой стали, по результатам которого 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. 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.

Исследовано влияние параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали на отбраковку рельсов из-за наличия внутренних дефектов и 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, фосфо-

ра, меди и олова в готовой стали оказывают значимое влияние на повышение отбраковки рельсов стали Э76ХФ по внутренним дефектам металлургического происхождения. Подтверждено снижение загрязненности стали неметаллическими включениями при уменьшении окисленности стали совместно с увеличением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в сталеразливочном ковше.

В третьей главе проведено численное моделирование процессов продувки расплава рельсовой стали инертным газом через донные фурмы и вдувания порошковых реагентов в струе газа через погружную фурму.

Показано, что увеличение интенсивности продувки обуславливает рост коэффициента эффективной диффузии по нелинейному закону во всех направлениях переноса и вне зависимости от режима взаимодействия газовых струй с металлом. В относительном выражении разница коэффициентов 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. Также установлено, что при струйном режиме истечения газовых струй диффузия проходит в 1,5-2,0 раза эффективнее по сравнению с пузырьковым режимом.

В четвёртой главе представлены результаты разработки и совершенствования технологических режимов выплавки и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения металлургического качества рельсов и технико-экономических показателей производства стали.

Показано, что увеличение длительности периода продувки расплава рельсовой стали при обработке на агрегате «ковш-печь» с интенсивностью более 0,55 м<sup>3</sup>/мин (33 м<sup>3</sup>/ч) через каждую донную фурму обуславливает снижение отбраковки рельсов по дефектам металлургического происхождения. В результате разработан усовершенствованный режим продувки расплава аргоном на агрегате «ковш-печь», внедрение которого позволило снизить отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения на 0,5 %, ожидаемый экономический эффект согласно Акту внедрения составляет 15 млн. руб./год при доленом участии автора – 25 %.

Разработана, прошла опытно-промышленное опробование и внедрена технология раскисления рельсовой стали с использованием силикомарганца марки FeMnSi30HP взамен силикомарганца марки МнС18. 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 %. Также 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 доленом участии автора 20 %.

Определена целесообразность выбора оптимального состава металлошихты исходя из влияния состава металлозавалки на технико-экономические показатели выплавки стали и разработана статистическая модель прогнозирования технико-экономических показателей производства рельсовой стали в зависимости от состава металлозавалки электроплавки. Разработанная модель применяется для оптимизации соотношения чугуна и лома в металлозавалке в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено Актом внедрения.

*В заключении* по диссертации сформулированы основные научные положения и изложены достигнутые практические результаты работы.

Результаты работы достаточно полно обсуждены на региональных, Всероссийских и Международных конференциях и семинарах. В целом, следует отметить хороший уровень и разнообразие экспериментальных и расчетных методов исследования, представленных и использованных автором, квалифицированное обсуждение результатов.

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.

Рассмотренный материал автореферата диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Наряду с несомненными достоинствами, по работе следует сделать некоторые замечания:

1. Автор в *Заключении* указывает, что: «На базе результатов проведенных исследований разработана, прошла опытно-промышленное опробование и внедрена в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» новая технология раскисления рельсовой стали на выпуске из печи с использованием ферросплавов с пониженным содержанием алюминия». На самом деле просто заменены обычные ферросплавы на комплексные, что очевидно должно было принести эффект. Данное изменение технологии имеет вид обычного рацпредложения.

2. На стр. 16 соискатель указывает: «В соответствии с требованиями действующей нормативной документации (ГОСТ Р 51685-2022) к основным параметрам качества рельсовых сталей следует относить: ... содержание газов (водород, кислород) – содержание кислорода контролируется в рельсах». Представляется, что данная формулировка просто не согласована. Если ссылаются на содержание газов (водород, кислород), а потом идет ссылка на то, что кислород контролируется в рельсах, возникает вопрос, а водород контролируется в рельсах?

3. На стр. 17 представлена фраза: «допустимое содержание кислорода в рельсах массового назначения (рельсы категорий Т1, Т2, Н) составляло 0040 %», пропущена запятая.

4. На стр. 51, в таблице 2.1 представлен состав шлака, при этом верхние значения содержания оксида магния составляют 54,3 %. Это очень большое значение. Необходимо дать пояснения.

5. На стр. 64 соискателем принимается, что диаметр пузырьков газа не превышает 5-6 мм. Однако из литературных источников известно, что в процессе продувки, при всплытии пузырька газа он увеличивается в диаметре и принимает сложную грибовидную форму, в дальнейшем, при всплытии он еще больше увеличивается в размерах и распадается на более мелкие пузырьки. Этот процесс увеличения и дальнейшего распада пузырьков газа происходит по мере их всплытия. Ряд авторитетных источников считает, что диаметр пузырьков газа можно принять 30-35 мм. Видимо соискателю необходимо подтвердить свое утверждение.

6. На стр. 87 при описании неметаллической части шихты указано, что: «Неметаллическая часть шихты включает в себя известь или известняк... и твердые окислители». Желательно пояснить в каких случаях применяется известняк и твердые окислители?

7. Необходимо уточнить интенсивность продувки во время вакуумирования (стр. 89). При вакуумировании, что циркуляционном, что ковшевом, как рассматривается в диссертации, важно не только время вакуумирования, а также и расход газа, поэтому, для более полного понимания процессов дегазации, необходимо добавить интенсивность продувки.

8. На стр. 99 в таблице 4.7 приведен сравнительный анализ механических свойств рельсов при использовании различных режимов раскисления рельсовой стали и приведены в случае нетермообработанных рельсов 5 параметров, включая твердость, а в случае термообработанных рельсов этот важный параметр не приведен. С чем это связано?

9. На стр. 110 соискатель указывает, что: «По результатам статистических исследований определен характер и степень влияния состава металлозавалки электроплавки рельсовой стали на технико-экономические показатели ее производства. ...Влияние состава металлозавалки на длительность плавки имеет нелинейный характер с выраженным минимумом при доле чугуна 30-35%. В чем новизна? Как указывалось в ряде классических работ (например: Рошин В.Е. Электрометаллургия и металлургия стали /В. Е. Рошин, А. В. Рошин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2013. – 572 с. и Дорофеев Г.А. Баланс и структура металлошихты в свете требований современного производства стали / Г.А. Дорофеев, Е.Х. Шахпазов, П.И. Югов [и др.] // Труды XI Конгресса сталеплавильщиков, 2011. – Москва: Черметинформация. – С. 206–209.), повышенная масса шлака приводит к перерасходу энергии на его нагрев, затягиванию плавки, усилению растворения футеровки шлаком. Соответственно, на практике существуют оптимальные значения расхода жидкого чугуна на электроплавку, около 30 %. Чугун содержит небольшое и более предсказуемое, в сравнении с ломом, количество остаточных цветных примесей, неудаляемых и трудноудаляемых в плавке (Cu, Sn, Cr, Ni и пр.). Поэтому чугун, а также металлизированное сырье, используются в шихте, обычно в количестве до 30 %, при производстве ряда ответственных сталей, чувствительных к содержанию цветных примесей.

Сделанные замечания носят частный характер, и не меняют общего положительного мнения о

