

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА», МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.05.2024 № 6

О присуждении Саитгараеву Альберту Ахметгареевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Совершенствование технологических режимов производства электротехнической изотропной стали с особонизким содержанием углерода и серы» по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов принята к защите 13.03.2024 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.324.01, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель, Саитгараев Альберт Ахметгареевич, 7 ноября 1978 года рождения.

В 2002 году окончил Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет) по специальности металлургия черных металлов. В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Работает в должности руководителя проектов Управления технического развития продаж в публичном акционерном обществе «Новолипецкий металлургический комбинат».

Диссертация выполнена на кафедре металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Кожухов Алексей Александрович, заведующий кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой Старооскольского технологического института Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

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»;

Аникеев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техника и технология производства материалов, заместитель директора филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) в г. Златоусте, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», в своем положительном отзыве, подписанном Коноваловым Сергеем Валерьевичем, доктором технических наук, профессором, проректором по научной и инновационной деятельности, Фейлер Сергеем Владимировичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой металлургии черных металлов и химической технологии, указали, что диссертация Сайтгараева Альберта Ахметгареевича ... «является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладающей внутренним единством, в которой на основании проведенных

автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики и технологическую независимость страны. Диссертация соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Полученные соискателем новые научные результаты, теоретические положения и выводы являются достаточно обоснованными. В работе решены актуальные научные задачи, связанные с разработкой эффективной технологии производства низкоуглеродистой, низкосернистой электротехнической изотропной стали. Автором работы разработана и внедрена оригинальная технология выплавки и внепечной обработки высококремнистой стали одношлаковым режимом. Соискатель Сайтгараев Альберт Ахметгареевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ (все статьи – в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ), 1 патент РФ на изобретение. Сведения об опубликованных работах достоверны. Авторский вклад соискателя объемом 1,07 п.л. в опубликованных работах общим объемом 3,69 п.л. состоит в постановке цели и задач исследования, разработке общей концепции теоретического исследования, построении математических моделей, проведении экспериментов, научном обосновании выявленных зависимостей, обработке и обобщении полученных результатов, подготовке работ к публикации.

К наиболее значимым научным публикациям относятся:

1. Дегтев, С.С. Совершенствование технологии конвертерного производства электротехнической изотропной стали с низким содержанием углерода. Сообщение № 1 / С.С. Дегтев, В.А. Лавров, А.А. Сайтгараев [и др.] // Сталь. – 2022. – №10. – С. 17 – 25;

2. Сайтгараев, А.А. Анализ и совершенствование технологии производства электротехнической изотропной стали с низким содержанием углерода в условиях конвертерного производства. Сообщение №2 / А.А. Сайтгараев, В.А. Лавров, С.С. Дегтев [и др.] // Сталь. – 2022. – №12. – С. 15 – 25;

3. Сайтгараев, А.А. Анализ и совершенствование технологии производства электротехнической изотропной стали с низким содержанием серы в условиях конвертерного производства / А.А. Сайтгараев, С.С. Дегтев, В.А. Лавров [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2022. – №11–12. – С. 27 – 35;

4. Сайтгараев, А.А. Совершенствование технологии конвертерного производства электротехнической изотропной стали с низким содержанием углерода. Сообщение № 3 / А.А. Сайтгараев, В.А. Лавров, С.С. Дегтев [и др.] // Сталь. – 2023. – № 12. – С. 14 – 23.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все отзывы положительные):

1. АО «ОЭМК им. А.А. Угарова», г. Старый Оскол, технический директор Гулов П.В.;
2. ОАО «ЭЗТМ», г. Электросталь, к.т.н. Степанов А.В.;
3. ФГБУ науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, д.т.н., профессор, академик РАН Григорович К.В.;
4. ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», г. Москва, д.т.н., профессор Богданов С.В.;
5. ПАО «НЛМК», г. Липецк, и. о. технического директора Настич И.В.;
6. ООО «ГМЗ», г. Гатчина, директор Афонин А.П.;
7. АО ЕВРАЗ НТМК, г. Нижний Тагил, к.т.н. доцент Метелкин А.А.;
8. АО «ОМК», г. Москва, к.т.н. Зубков Ю.Ю.;
9. ООО «ВПО-Сталь», г. Одинцово, к.т.н. Съемщиков Н.С.;
10. ФГБОУ ВО «ЛГТУ», г. Липецк, к.т.н. Роговский А.Н., к.т.н. Шипельников А.А.;
11. ФГБОУ ВО «СГТУ», г. Самара, д.т.н. Муратов В.С.

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

1. Не отмечен полный цикл обработки электротехнической стали в условиях конвертерного производства. Последовательность передачи производственных слэбов на последующие переделы.

2. Осуществлялась ли оценка влияния на магнитные свойства помимо углерода и серы других вредных примесей, таких как P, B, N, Ti?

3. Автор не раскрывает поведение фосфора по ходу плавки. Какое количество конвертерного шлака поступает в сталеразливочный ковш? Какая степень дефосфорации металла в окислительный период и степень его рефосфорации после раскисления?

4. Автор в главе 4 (стр. 8 автореферата) использует многомерный регрессионный анализ для оценки значимости различных факторов на процесс вакуумного обезуглероживания. В автореферате не представлена сама модель, но даны конкретные рекомендации по параметрам вакуумирования. При этом коэффициент детерминации, который оценивает качество подбора уравнения регрессии, составляет  $R^2=0,31$ , что ставит смысл представленной модели под большое сомнение. То же касается определения влияния углерода и серы на величину удельных магнитных потерь ( $P_{1,5/50}$ ) (стр. 16, рис. 5), где коэффициент детерминации предложенной автором статистической модели также составляет 0,347.

5. Автор детально не рассматривает ни один из трех возможных механизмов, вносящих различный вклад в обезуглероживания расплава в циркуляционном вакууматоре: поверхностный, пузырьковый, капельный. Предлагаемое же автором снижение расхода лифт-газа аргона со  $140 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$  при малых концентрациях углерода в расплаве противоречит общепринятым представлениям о том, что при низких концентрациях углерода процесс переходит в кинетический режим, где определяющим механизмом обезуглероживания становится скорость обмена реакционной поверхности в камере вакууматора. Пузырьки же ее значительно увеличивают.

6. При анализе влияния шлака на десульфурацию расплава автор оценивает: «... десульфурующую разницу между верхним слоем шлака... и слоем,

контактирующим с жидким металлом». Из автореферата неясно, каким образом проводились измерения, их точность и как рассчитывали десульфурацию.

7. Имеются в автореферате также ошибочные утверждения и некорректные термины, например: автор (стр. 6 автореферата) в четвертом абзаце, рассуждая о чистоте металла по «...вредным примесям С и S объемные доли, которых формируются на этапе выплавки и ковшевой обработки...» далее путает их с процентами по массе. Реакция (5) (стр. 14) не является «...реакцией десульфурации расплава кальцием ... при высокой концентрации Al». Термины: «...декарбонизация» (стр. 11), «...Использование потенциала металла...» (стр. 18), какого?

8. В автореферате на с. 14 приведена реакция взаимодействия твердой извести с серой в алюминийсодержащем стальном расплаве с уравнением  $\Delta G^0 = -375149 + 140,96 T$ , которое является мало информативным для реальной термодинамической оценки равновесных условий десульфурации при температурах сталеплавильных процессов. Для этого следовало бы указать рассчитанные значения  $\Delta G$ , которые должны быть меньше 0, а также равновесные концентрации реагентов в соответствующем температурном интервале.

9. В заключении на с. 18 автор обратил внимание на возможность перевода окислительного шлака в восстановительный для проведения глубокой десульфурации металлического расплава на установке доводки металлов, при этом он не указал на изменение основности шлака, которая важна для оценки сульфидной емкости шлака, что также влияет на эффективность удаления серы из стали перед разливкой.

10. Не совсем понятна авторская трактовка экономической эффективности от внедрения результатов диссертационной работы (см. с. 4, 18), поскольку в автореферате не указаны конкретные статьи снижения затрат при производстве товарной продукции из электротехнических сталей. Многомиллионные и даже миллиардные в рублевом эквиваленте цифры, должны быть обоснованы более корректно.

11. Судя по коэффициенту корреляции, которое составляет 0,56 ( $R^2 = 0,31$ ) для случая проведения обезуглероживания в вакууматоре, не все параметры влияющие на степень удаления углерода учтены.

12. Каким образом осуществляется контроль шлака при выплавке электротехнических изотропных сталей?

13. Какой фактор. По мнению автора, наиболее сильно влияет на остаточное содержание углерода в металле?

14. Какой состав наполнителя используется в кальциевой проволоке?

15. Имело ли место снижение транспортирующего газа ниже представленного минимума в  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$  во время этапа обезуглероживания? Если да, то какой эффект наблюдался по обезуглероживанию?

16. Рассматривался ли в процессе исследований факт износа огнеупоров патрубков и его влияние на обезуглероживание расплава?

17. На рисунке 5 приведен коэффициент  $R^2 = 0,3472$ , т. е. коэффициент корреляции составляет 0,59, что говорит о том, что есть дополнительные параметры, оказывающие воздействие на удельные магнитные потери, кроме содержания серы и углерода.

18. Не исследованы причины прироста концентрации углерода после внепечной обработки стали в процессе ее разливки.

19. Подписи к кривым изменения температуры на рисунках 2 и 4 (стр. 11 и 15 автореферата) плохо читаемы, что затрудняет анализ тренда кривой.

20. В автореферате не указано каким пунктам паспорта специальности 2.6.2 соответствует данная работа.

21. На с. 16 все перечисленные технологические приемы декларируются как направленные на снижение степени науглероживания. Приемы десульфурации отдельно не выделены.

22. На графиках рис. 6 и рис. 7 можно неоднозначно трактовать обозначение горизонтальных осей. Что, разное содержание элементов получено при разном количестве плавок? Или это просто порядковый номер плавки, тогда причем здесь указанная размерность «шт»?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновываются их известными систематическими исследованиями и научными работами, опубликованными в высокорейтинговых рецензируемых журналах по проблемам диссертационного исследования в области теории и практики производства электротехнической изотропной стали, в том числе математического моделирования процессов глубокого обезуглероживания и десульфурации расплава электротехнической изотропной стали (ЭИС), глубокого рафинирования металлического расплава по углероду и сере на агрегате циркуляционного вакуумирования (АЦВ) и установке доводки металла (УДМ) ЭИС, что обеспечило в стали новой конвертерной марки М250-50А низкие удельные магнитные потери, результаты исследования диссертантом позволили осуществить производство ЭИС по схеме импортозамещения зарубежных поставок и обеспечить техническую, технологическую и энергетическую безопасность РФ.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** новая научная концепция производства электротехнической изотропной стали на базе установленной приоритетной значимости факторов, влияющих на процесс глубокого обезуглероживания металла при рафинировании в циркуляционном вакууматоре: начальной окисленности системы металл-шлак, начальной температуры металла, интенсивности подачи транспортирующего газа (лифт-газа). На долю этих указанных факторов приходится до 75 % в обеспечении содержания углерода в ЭИС менее 0,002 %;

**предложен** нетрадиционный подход к вопросу интенсификации процесса обезуглероживания, выражающийся в снижении интенсивности подачи транспортирующего газа, механизм десульфурации металла с использованием одношлакового режима (без смены окислительного и наведения восстановительного шлака), при этом снижение окисленности шлака и повышение его сульфидной емкости достигается за счет взаимодействия металлического расплава с высоким содержанием кремния и алюминия со шлаком, окисленность шлака, при этом, снижается до содержания оксидов железа менее 0,5% и серы в металле менее 0,002%;

**доказана** перспективность использования идей обезуглероживания и десульфурации в практике производства электротехнических изотропных марок стали. Достигнутые средние содержания углерода в маркировочной пробе на уровне 0,00276% и серы на уровне 0,00197% позволили обеспечить уровень удельных магнитных потерь не превышающие 2,5 Вт/кг;

**введены** новые представления о кинетике удаления углерода из расплава, когда содержание последнего составляет менее 0,005%, включающих требования по снижению скорости перетечения металла через патрубки агрегата циркуляционного вакуумирования, обеспечения пузырькового режима, новые представления по использованию таких элементов как кремний и алюминий, содержащихся в электротехнических изотропных сталях в больших концентрациях, для проведения диффузионного раскисления шлака.

**Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:**

**доказано** уравнением многомерного регрессионного анализа, выражающего связь между конечным содержанием углерода и технологическими факторами, необходимость обеспечения пузырькового режима обработки расплава путем снижения интенсивности газового потока в металле на этапе обезуглероживания на агрегате циркуляционного вакуумирования и получения содержаний C менее 0,002%, возможность перевода окислительного шлака (без смены окислительного шлака и наведения восстановительного шлака) за счет кремния и алюминия в электротехнических изотропных сталях, обеспечивающее понижение FeO в шлаке до значений менее 0,5%, а следовательно и содержания S в металле до значений менее 0,002%;

**применительно к проблематике диссертации результативно** (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы:** статистический анализ, многомерный регрессионный анализ, математическое моделирование, методы планирования эксперимента с получением результатов, обладающих новизной;

**изложены** аргументы и факты в пользу возможности получения ультранизких значений по содержаниям углерода и серы применительно к действующему производству ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат».

Наблюдалось получение фактических значений получаемого содержания С после этапа обезуглероживания и S на установке доводки металла на уровне 0,0003 и 0,0007% соответственно. Тенденции по использованию существующих агрегатов Конвертерного цеха № 1 говорят о потенциале в обеспечении уровня вредных примесей применительно к электротехническим маркам стали;

**раскрыты** и выявлены проблемы, связанные с глубоким рафинированием стали в циркуляционном вакууматоре в зависимости от ряда факторов с определением степени влияния каждого из них, технологические параметры, влияющие на степень десульфурации, обоснованность применения весьма затратных технологических решений для получения столь низких содержаний углерода и серы в металле;

**изучены** причинно-следственные связи влияния технологических приемов и режимов обработки в Конвертерном цехе № 1 на содержание углерода и серы в маркировочной пробе. Рассмотрены вопросы не только удаления данных элементов из расплава, но и возможные пути поступления С и S обратно в металл;

**проведена модернизация** существующих математических моделей с применением многомерного регрессионного анализа (МРА) при определении значимости факторов, влияющих на процесс глубокого обезуглероживания электротехнической изотропной стали, а также технологические приемы, обеспечивающие интенсификацию процесса раскисления шлака с целью проведения дальнейшей десульфурации.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** эффективные технологические режимы выплавки электротехнической изотропной стали в Конвертерном цехе № 1 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», обеспечивающие снижение содержания углерода и серы в готовой стали до уровня не более 0,003 и 0,002% соответственно;

**определены** пределы и перспективы практического использования фундаментальных положений теорий обезуглероживания и десульфурации расплава, а именно: на основе математических моделей (в том числе

многомерного регрессионного анализа) выявлена приоритетность влияния технологических факторов на процесс обезуглероживания стали на агрегате циркуляционного вакуумирования, механизм диффузионного раскисления шлака кремнием и алюминием расплава, приоритетная значимость влияния углерода и серы на магнитные свойства конечного продукта;

**создана** комплексная технология выплавки электротехнической изотропной стали в Сталеплавильном производстве: конвертере, ковшевой обработке на агрегате «Печь-ковш», циркуляционном вакууматоре и установке доводки металла с обеспечением низких значений по вредным примесям таких как углерод и сера, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики, соответствующие требованиям потребителей;

**представлены** рекомендации по совершенствованию комплексной технологии производства электротехнической изотропной стали с наилучшими потребительскими свойствами в условиях конвертерных производств. Технологические приемы и режимы могут быть использованы другими отечественными предприятиями, производящие электротехнические марки стали, такие как ПАО «Северсталь», ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и др.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**эксперименты** проведены на технологических агрегатах Конвертерного цеха № 1 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», оснащенных современной сертифицированной контрольно-измерительной аппаратурой с применением эффективной исследовательской аппаратурой (атомно-эмиссионного спектрального анализа, метода восстановительного плавления, рентгенофлуоресцентного метода, атомно-эмиссионного метода с индуктивно связанной плазмой, метода инфракрасной спектроскопии) и статистической обработкой полученных результатов с применением программного продукта Minitab;

**теория** диссертационной работы построена на базе современных достижений в области теории обезуглероживания расплава, интенсивности потока

инертного газа в металле, диффузионного раскисления шлака, десульфурации и практики металлургических процессов;

**идеи базируются** на фундаментальных теоретических положениях конвертерного способа производства стали, ее внепечной обработки, включающие обезуглероживание и десульфурацию расплава, описанные в трудах А.М. Самарина, Л.М. Новика, В.А. Григоряна, Л.Н. Белянчикова, А.Я. Стомахина, В.С. Дуба, А.М. Бигеева, В.А. Бигеева, А.Е. Семина, В.Е. Рощина, Д.Я. Поволоцкого, К.В. Григоровича, Г.И. Котельникова, Н.А. Смирнова, Д.Г. Еланского, Б.В. Линчевского, А.С. Лаврова, А.Г. Зубарева, С.В. Себякина и др., и не противоречат результатам, представленным в независимых источниках;

**использованы** сравнения, полученные автором данных с данными из независимых научных источников, выявленные по результатам сделанного литературного обзора, например, обеспечение углерода в металле на уровне менее 0,03% возможно только с применением вакуумных установок, десульфурация расплава возможна с применением высокоосновного шлака;

**установлен** высокий уровень сходимости результатов моделирования и промышленных испытаний, выход годного электротехнической изотропной стали с удельными магнитными потерями менее 2,5 Вт/кг увеличился более чем в 2 раза;

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации компьютерным способом с применением современного программного обеспечения, измерительные приборы и пакеты прикладных программ (MS Excel, Minitab), обширный литературный материал.

**Личный вклад соискателя состоит** в формулировании цели и задач исследования, организации и проведении лабораторных и промышленных экспериментов, самостоятельном анализе и интерпретации результатов исследования, внедрении результатов экспериментов в производство, в том числе и в подготовке нормативной документации, формулировании основных положений и выводов диссертации.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

### **В отзыве ведущей организации:**

1. В работе приводятся причинно-следственные схемы влияния технологических приемов и режимов обработки в Конвертерном цехе № 1 на содержание углерода и серы в маркировочной пробе. Следует дать экспертную количественную оценку влияния данных технологических приемов и режимов обработки на данные элементы.

2. При рассмотрении влияния интенсивности циркуляции на структуру газового потока приводятся расчеты для трех значений интенсивности подачи транспортирующего газа: 80 м<sup>3</sup>/ч, 100 м<sup>3</sup>/ч, 140 м<sup>3</sup>/ч. Предлагается рассмотреть скорости истечения газа при дополнительных расходах транспортирующего газа: 85 м<sup>3</sup>/ч, 90 м<sup>3</sup>/ч, 95 м<sup>3</sup>/ч, 105 м<sup>3</sup>/ч и т. д. с построением графиков зависимостей влияния площади всасывающего патрубка, диаметра аргопровода и т. д. на скорости истечения газового потока.

3. В работе представлено влияние высоких содержаний кремния и алюминия на раскисление таких соединений как P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> и как следствие восстановление фосфора и титана с переходом их в металл. Необходимо рассмотреть восстановление других соединений, таких как Cr<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, поскольку хром для электротехнической марки стали также является нежелательным элементом.

### **В отзыве официального оппонента Шешукова О.Ю.:**

1. При рассмотрении режимов истечения газа из пузырькового режима в струйный соискатель рассматривает его подачу снизу в вертикальной плоскости, однако в циркуляционном вакууматоре газ подается в горизонтальных плоскостях. Желательно дать пояснение, как может повлиять данная неточность на общие выводы по декарбонизации расплава?

2. При эксплуатации вакуум-камеры происходит износ футеровки, что приводит к увеличению внутреннего диаметра впускного патрубка и изменению технологических параметров обработки стали. Учитывался ли данный факт при анализе обезуглероживания?

3. Какая схема футеровки и типы огнеупорных изделий используются в рабочей футеровке сталеразливочного ковша Конвертерного цеха № 1 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»? Какие дальнейшие, наиболее

перспективные, типы огнеупоров предполагается использовать при выплавке марок стали рассматриваемых в диссертации?

4. В выводах к разделу 4 соискатель указывает: Экспериментально установлено и подтверждено, что на содержание серы в расплаве влияют следующие факторы: состав, объем, окисленность шлака, расход, скорость и период отдачи порошковой проволоки, температурный режим обработки и режим продувки инертным газом (Ar) на установке доводки металла. Определены оптимальные диапазоны их изменения для проведения глубокой десульфурации.

По этому выводу считаю нужным отметить следующее:

Со стр. 139 по стр. 145 идет описание процесса обработки расплава кальцийсодержащими материалами (порошковой проволокой). За период проводимых исследований было опробовано несколько вариантов подачи порошковой проволоки с кальциевым наполнителем, рассмотрена зависимость, позволяющая определить скорость ввода порошковой проволоки с наполнителем из силикокальция.

В настоящее время вопросы введения порошковой проволоки подробно описаны и существуют расчетные методы, например: 1) Лозовая Е.Ю., Шешуков О.Ю., Жучкова В.И., Виноградов С.В. Плавление силикокальция, вводимого в жидкую сталь различными способами // *Сталь*. – 2005. – №12. – С. 21-23; 2) Лозовая Е.Ю., Шешуков О.Ю., Жучков В.И., Бурмасов С.П., Виноградов С. В. Оценка времени плавления силикокальция при вводе в жидкую сталь различными способами // *Металлургия и горная промышленность* – 2006. – № 7. – С. 185-187.

Учитываются все теплофизические характеристики расплава, модификатора, оболочки, параметры ковша и самое главное величина заглубления – 200 мм от дна ковша. Скорость введения порошковой проволоки в этом случае определяется просто.

5. Соискатель дважды приводит результаты химического анализа состава шлака при обработке расплава в промежуточном ковше установки непрерывной разливки стали (УНРС) (табл. 16 на стр. 64) и полученного из сталеразливочного ковша после разливки металла на УНРС (табл. 38 на стр.149), указывая, что по окончании разливки металла содержание  $Fe_{общ}$  менее 1,0% (табл. 38). Также

отмечено, что полученные фактические результаты отношения  $(CaO)/(FeO)$  находятся на уровне  $20 \div 30$ , что говорит о достаточной емкости шлака по отношению к сере, превышающие значения, описанные в [22] в 8 и более раз.

Считаю необходимым отметить следующее: При своих оценках процесса десульфурации соискатель не дал оценки шлаков по содержанию оксида алюминия  $Al_2O_3$ , а фактически оно находится в пределах от 38,9% и до 50,3%. При таком содержании  $Al_2O_3$  шлак «кислый» т. к. данный оксид амфотерный с содержания свыше 16% начинает проявлять кислотные свойства, поэтому никакой десульфурации быть не может. Но возможно, в таблице 38 перепутано наименование столбцов  $CaO$  и  $Al_2O_3$ .

### **В отзыве официального оппонента Аникеева А.Н.:**

1. В диссертации на стр.14, рис. 1 приведены данные литературных источников о влиянии химических элементов на уровень магнитных свойств, в том числе для углерода и серы, начиная с концентраций 0,0025 – 0,0030%. В работе проводится регрессионный анализ с применением базы фактических данных и получена совокупная зависимость магнитных потерь от содержания углерода и серы. На основании этих данных в п.3 научной новизны делается вывод о том, что «влияния серы на магнитные свойства в 1,75 раза сильнее», но, собственно, этот вывод можно было сделать, просто проанализировав литературные данные (при сопоставлении графиков можно наблюдать почти полное их совпадение).

2. В ходе первичной проработки диссертантом были определены более 35 факторов, оказывающих влияние на удаление и поступление углерода в расплав после этапа обезуглероживания. Далее проведена огромная работа по оценке значимости всех факторов, проведены исследования режимов продувки, состава ферросплавов и предложено множество мероприятий по снижению C. Вместе с тем известно, что одной из достаточно простых возможностей получения сверхнизкого содержания углерода является применение газообразного водорода: имеются данные зарубежных исследователей о получении содержания 0,0007% за 25 минут обработки (сопоставимо с временем обработки на агрегате циркуляционного вакуумирования). Проводилась ли оценка возможности

обработки водородом? Возможно, соискателю стоило выбрать принципиально другой, более простой способ снижения углерода?

3. В работе предлагается снижать интенсивность продувки металла с 140 м<sup>3</sup>/ч до 80 м<sup>3</sup>/ч для более полного обезуглероживания. Вместе с этим, известно, что интенсивность перемешивания металла будет влиять и на другие параметры: например, количество неметаллических включений в стали. Проводилась оценка влияния предлагаемых мероприятий на содержание неметаллических включений в стали?

4. На стр. 158 диссертации приведен график, отражающий основные данные процесса десульфурации по серии плавов (рис. 4 автореферата). На графике показано, что начальная и финальная температура плавки I составляет 1615 – 1578°С, температуры II-VI плавов 1590 – 1555°С.

График содержания серы приведен один и из текста диссертации непонятно:  
- приведенные данные – это усредненные данные содержания серы для всех (1-6) плавов?

- чем обусловлена такая разница температур обработки между I и II-VI плавками.

5. В главе 5 делается вывод, что в результате комплекса мероприятий определено «оптимальное количество пробоотборников и термопар» (стр. 16 автореферата), при этом в тексте диссертации указано, что рекомендуется применение «разумного, минимального количества пробоотборников и термопар». Проводился ли расчет максимально допустимого количества отбор проб и замеров?

#### **От членов диссертационного совета:**

1. В регрессионном многомерном анализе рассматривается большинство технологических факторов, учитывались ли в работе компетенции технологического персонала (человеческий фактор)?

2. Учитывалось ли в работе влияние неметаллических включений за счет износа огнеупоров на магнитные свойства в процессе интенсификации продувки?

3. Озвучьте пожалуйста основную научную новизну вашей работы.

4. На рисунках слайдов презентации 15 и 22 различное содержание FeO в шлаке в начале процесса, в чем разница?
5. На рисунке слайда 22, помимо содержания серы, не представлено изменение содержания углерода по ходу процесса, в особенности после присадки легирующих. Как ведет себя углерод на данных этапах?
6. Как изменяется коэффициент распределения серы на этапах обработки металла от агрегата циркуляционного вакуумирования до установки доводки металла (АЦВ-УДМ)? Как изменяется сера в металле на данных этапах?
7. Вероятно на слайде 23 в таблице ошибка: остаток металла не в промежуточном ковше установки непрерывной разливки стали, а в сталеразливочном ковше?
8. Как влияет футеровка сталеразливочного ковша, промежуточного ковша, используемых шлакообразующих смесей (ШОС) на увеличение содержания углерода в металле? Оценивалось ли количество углерода, поступающего в металл с огнеупоров, материалов на этапе разливки?
9. В работе указано, что вами установлено значительное влияние серы, в 1,75 раза, чем углерода. Чем это объясняется? Каков механизм?
10. Отмечалось ли изменение текстуры электротехнических сталей, поскольку последний этап обработки определяет конечные магнитные характеристики?
11. Какие механические свойства электротехнической изотропной стали анализировались в работе?
12. В таблице 10 слайда презентации представлены статистические показатели R-Sq, R-Sq (adj), R-Sq (pred), P-значение – что они обозначают? Какой из R-Sq исправленный на степень свободы в вашем регрессионном многомерном анализе?
13. На контрольной карте слайда 12 презентации каждая точка – это индивидуальное значение плавки или среднее значение кампании плавков?
14. На рисунке слайда 15 презентации наблюдается сильный разброс значений, например, по содержанию кислорода в металле. Каким методом, при

таком разбросе точек, получена данная линия (методом наименьших квадратов, взвешенных квадратов и т.д.)?

15. Вы как работник ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» скажите, собирается ли комбинат переходить на производство прецизионных сплавов (Fe-Ni, Fe-Co и т. д.), которые дают на порядок выше показатели по магнитным характеристикам? И если нет, то почему?

16. Вы в работе боретесь со снижением углерода и серы в металле с целью снижения затрат на перемагничивание, а что делать с затратами, которые идут на вихревые потоки (токи Фуко).

17. На рисунке слайда 15 презентации какой временной промежуток между концом обработки на агрегате циркуляционного вакуумирования и началом обработки на установке доводки металла? И какой, по вашему мнению, он должен быть в идеале?

Соискатель Саитгараев Альберт Ахметгареевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

На сегодняшний день производство динамных марок сталей 4-й группы легирования является периодическим, то есть вакууматор за кампанию по стойкости, ориентировочно, в 50 плавов на 80% используется под производство низкоуглеродистого сортамента (08Ю и аналогов). С вводом в эксплуатацию нового агрегата циркуляционного вакуумирования в ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» рассматривается вопрос перевода старого вакууматора под производство только динамных групп марок сталей, где будут рассматриваться предлагаемые режимы подачи транспортирующего газа с построением графиков зависимостей влияния площади всасывающего патрубка, диаметра аргопровода и т. д. на скорость истечения газового потока без учета влияния факторов при которых на вакууматоре обрабатывается другой сортament.

Задача по снижению содержания хрома в расплаве не ставилась, поскольку оптимизация содержаний углерода и серы позволили достичь целевых значений по удельным магнитным потерям.

В работе сравнивались данные по скорости истечения аргона, полученные в процессе исследования (66 м/с при расходе Ar 80 м<sup>3</sup>/ч – min расход для агрегата

циркуляционного вакуумирования Конвертерного цеха № 1) с оптимальными скоростями, предложенные авторами С.В. Коминов, А.Е. Семин, Ф.В. Чуйков, где согласно критериям перехода от пузырькового к струйному режиму истечения газа работаем при переходном режиме ближе к струйному. Помимо этого, учитывалась рациональная плотность (минутный расход на единицу площади поперечного сечения всасывающего патрубка) транспортирующего газа, которое, по данным авторов А.В. Протасова, Б.А. Сивака, Н.А. Чиченева, составляет  $5,0 \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$ , для нашего случая  $4,72 \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$ , что говорит о нахождении данных показателей в одних пределах. Практика показывает, что при скорости истечения газа 115 м/с (при максимальном расходе транспортирующего газа на агрегате циркуляционного вакуумирования –  $140 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) эффективность обезуглероживания заметно снижается, следовательно, данной неточностью, по способу подачи Ar (горизонтально или вертикально), на общие выводы по декарбонизации расплава можно пренебречь.

Геометрия внутреннего диаметра впускного патрубка изменяется, в том числе, очевидно меняется и сечение канала подачи транспортирующего газа. Но как упомянуто ранее, данный факт будет учитываться в дальнейших работах при переводе действующего циркуляционного вакууматора под производство только динамных марок сталей.

Типы огнеупорных изделий, применяемые в рабочей футеровке сталеразливочного ковша, в том числе и их сочетания: стена «шлаковый пояс» - кирпич, стена «зона металла» - кирпич, стена «зона металла» – бетон, дно – кирпич, дно – бетон, шоткретирование стены «шлакового пояса» и стены «зона металла» осуществляется по любым схемам. Ведется проработка поставок марок огнеупорных изделий с содержанием углерода не более 8% компании «Chosun Refractories», низкоуглеродистых огнеупорных бетонов с содержанием углерода не более 1,5%.

В диссертации пользовались работами Крупенникова С.А. по влиянию скорости на заглубление порошковой проволоки с оценкой глубины освобождения наполнителя.

Не исключено место ошибки в виду слива части шлака на металлическую плиту, имеющую следы шлакометаллической настыли (брызг) от других плавов. Повторный отбор проб шлака на химический анализ из промежуточного ковша (первая проба) и после слива шлака в шлаковую чашу (последняя проба) показал, что содержание  $Al_2O_3$  не превышает значений в 16%.

Согласно рисунка зависимость для углерода справедлива начиная с концентраций 0,0025 – 0,0030%, и для серы условно такие же показатели. В работе приведена оценка зависимостей, в частности серы для концентраций менее указанных выше значений на основе полученных фактических результатов ( $C=0,0023\div 0,0070\%$ ,  $S=0,0007\div 0,0048\%$ ), то есть перспективные свойства металла связаны с долей этих элементов менее значений в 0,003%, в этом и основной смысл, идея работы.

В совместной работе с СТИ НИТУ «МИСИС» обозначено направление использование водорода как дальнейшее развитие процессов глубокого рафинирования от углерода. Рассчитываем, что к 2026 году будет отработана технология обезуглероживания при помощи водорода, поскольку дальнейшей целью является получение удельных магнитных потерь менее 2,1 Вт/кг.

Работа по снижению попадания неметаллических включений в металл ведется на протяжении всего процесса. Можно сказать, что «нужно торопиться, но торопиться не очень быстро», поскольку кинетические факторы в данных условиях следует считать определяющими.

На рисунке 70 диссертации или рисунок 4 автореферата приведено среднее значение по сере для всех плавов в компании (компания от 4 до 6 плавов). Как можно увидеть из распределения фактических значений это может быть отнесено и к различным температурам, однако целью данной средней линии является показать факт снижения содержания серы вне зависимости от температуры.

Разница температур обработки первой плавки в серии и последующих обусловлена тем, что при постановке сталеразливочного ковша на стенд УНРС разливка не начинается до тех пор, пока второй в серии ковш с металлом не пройдет полную обработку на установке доводки металла и не будет готов – обеспечивается 100% цикличность разливки.

Определено, что суммарное количество пробоотборников и термодар не должно превышать 10 штук. Данное количество может привести дополнительно 0,5 кг углерода (0,0003%).

Человеческий фактор в процессе экспериментальных работ учитывался, например, отмечено, что технологическим персоналом не указывается объем кислорода, который был подан в период обезуглероживания на циркуляционном вакууматоре, осуществлялся сброс использованных пробоотборников и термодар в сталеразливочный ковш для утилизации.

Основная научная новизна заключается в том, что доказана необходимость снижения интенсивности подачи транспортирующего газа на агрегате циркуляционного вакуумирования в период обезуглероживания, возможно провести десульфурацию электротехнической изотропной стали за счет перевода окислительного шлака в восстановительный (без смены шлаков) путем диффузионного раскисления последнего содержащимися в металле Si и Al.

Разница значений FeO на слайдах 15 и 22 в том, что металл обрабатывается на различных агрегатах (агрегат «Печь-ковш» (АПК)-агрегат циркуляционного вакуумирования (АЦВ) и агрегат циркуляционного вакуумирования (АЦВ)-установка доводки металла (УДМ)-установка непрерывной разливки стали (УНРС)).

Углерод после присадки легирующих увеличивается в среднем на 0,001%.

Фактический коэффициент распределения на этапах АЦВ-УДМ увеличивается, в среднем, с 12 – 20 до 30 – 90.

Однозначно футеровка промежуточного ковша, шлакообразующие смеси и т. д. влияют на увеличение содержания углерода в металле. Среднее увеличение углерода на этапе разливки может составить 0,00076%. Оптимизация содержания углерода и серы на ранних этапах, без учета влияния оборудования и материалов установки непрерывной разливки стали, позволили достичь целевых значений по удельным магнитным потерям.

Большее влияние серы на магнитные свойства, чем углерода установлено в ходе полученных фактических результатов по магнитным свойствам. Полагаю,

что сера образует включения сульфидов и препятствуя росту зерен негативно сказывается на удельных магнитных потерях.

Оценка по изменению текстуры электротехнической изотропной стали в работе не ставилась.

Механические свойства электротехнической изотропной стали в работе не оценивались, но от коллег прокатного производства получена информация по удовлетворенности испытаниями на штампуемость, предел текучести и т. д. рассматриваемой марки стали.

R-Sq показывает адекватность модели на основе базы данных используемых факторов (в регрессионных моделях степени свободы используются для проверки пригодности модели) и зависимой переменной, в данном случае – углерода, R-Sq (adj) – предсказание модели, в случае повторения эксперимента с аналогичной базой данных используемых факторов и зависимой переменной, R-Sq (pred) – предсказание модели, в случае проведения одной плавки с используемыми факторами и зависимой переменной. P-значение – уровень значимости.

На контрольной карте каждая точка – индивидуальное значение содержания углерода.

В виду необходимости визуализации большого количества зависимостей от изменений времени все линии на графике построены на основе средних значений в указанный период.

В ближайшем будущем ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» не планирует переход на производство прецизионных сплавов в виду отсутствия опыта производства таких сплавов и возможности разливки таких сплавов на действующих установках непрерывной разливки стали.

Влияние потерь из-за вихревых потоков не рассматривался, поскольку запрос от наших прокатчиков был только на снижение удельных магнитных потерь.

Фактический временной промежуток времени на этапе передачи сталеразливочного ковша от циркуляционного вакууматора до установки доводки металла составляет: на первой плавке в серии от 15 до 25 минут, последующих плавках от 10 до 15 минут – это зависит от цикличности работы установки

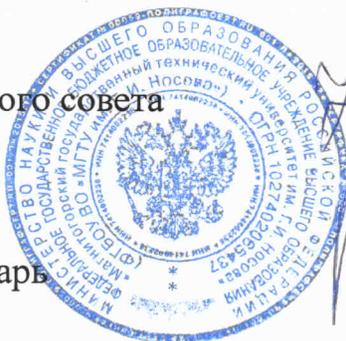
непрерывной разливки стали. Идеальное время выдержки должно составлять не менее 15 минут.

На заседании 21.05.2024 диссертационный совет принял решение за новые научно обоснованные технологические решения, включающие эффективные режимы выплавки и внепечной обработки электротехнической изотропной стали, имеющие существенное значение для развития страны и металлургической отрасли Сайтгараеву Альберту Ахметгареевичу присудить ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов, участвовавших в заседании, из – 21 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель

диссертационного совета



Колокольцев Валерий Михайлович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Мезин Игорь Юрьевич

21.05.2024 г.