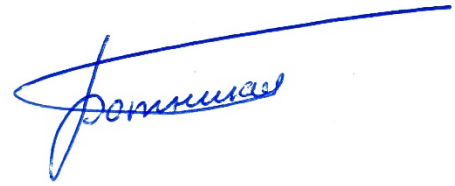


На правах рукописи



БОТНИКОВ Сергей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛИ ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ В УСЛОВИЯХ  
СОВРЕМЕННЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЦЕХОВ**

Специальность 2.6.2 –  
Металлургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Челябинск – 2024

**Работа выполнена** в Акционерном обществе «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»).

**Научный консультант** – Михайлов Геннадий Георгиевич, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Официальные оппоненты:**

**Бигеев Вахит Абдрашитович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»);

**Косырев Константин Львович** – доктор технических наук, советник технического директора Открытого акционерного общества «Электростальский завод тяжелого машиностроения», г. Электросталь;

**Кожухов Алексей Александрович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой, заместитель директора по науке и инновациям Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал ФГАУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»), г. Старый Оскол.

**Ведущая организация** – Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»), г. Москва.

**Защита диссертации состоится** 22.05.2024 г. в 14:00 в ауд. 1001 главного учебного корпуса на заседании диссертационного совета 24.2.437.01 на базе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ.

**С диссертацией можно ознакомиться** в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», а также на сайте: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243701-d-21229801/botnikov-sergey-anatolevich-0>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-92-28.  
e-mail: sbotnikov@bk.ru

**Автореферат разослан** «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Шабурова Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Впервые термин «чистая сталь» был предложен Гуляевым А.П. в 1975 году. Данная сталь содержит сумму атомов серы, фосфора, кислорода, азота и водорода (S, P, [O]<sub>общий</sub>, N и H) на 1 млн. атомов железа менее 1500. При современном уровне технологии производства стали этот термин охватывает почти все стали, производимые в электросталеплавильном и кислородно-конвертерном цехах. Чистота стали является важным фактором её качества и потребность в более чистых сталях растёт с каждым годом. С 1960 г. по настоящее время было отмечено следующее снижение вредных примесей в стали: кислорода от 6 до 15 раз; водорода от 3 до 6 раз; азота от 2 до 10 раз; серы от 10 до 30 раз; фосфора от 3 до 6 раз.

Отсутствие общего подхода получения «чистой стали» и учёта всех происходящих процессов в единой технологической цепочке «выплавка – выпуск плавки – внепечная обработка – разливка стали», приводят к ошибочным решениям по себестоимости стали или производительности цеха. Поэтому следует решить задачу по разработке комплекса технологических мероприятий производства стали с низким содержанием неметаллических включений на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла.

В этих условиях существенно повышается необходимость поиска новых подходов к решению указанных проблем и проведения дальнейших исследований физико-химических закономерностей поведения неметаллических включений от выплавки до кристаллизации металла. Такие исследования необходимо проводить для контроля процессов образования неметаллических включений в период активной работы с жидким и кристаллизующимся металлом. Несмотря на многочисленные работы отечественных и зарубежных учёных, которые проводили исследования в данной области на выплавке, внепечной обработке и разливке стали за последние 30 лет, требуется комплексный подход с учётом теории и практики процессов производства стали для дальнейшего решения рассматриваемых проблем. Сегодня вопрос производства чистых сталей по-прежнему является приоритетным у металлургов, производящих высококачественную сталь с низким содержанием общего кислорода, неметаллических включений, примесей и газов и является весьма **актуальной научно-технической проблемой.**

**Целью диссертационной работы** является разработка комплексной технологии получения стали с повышенными требованиями к её чистоте по содержанию неметаллических включений, примесей и газов в условиях современных сталеплавильных цехов с учётом всей технологической цепочки.

### **Задачи исследования.**

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи.

1. Выполнен анализ современного состояния технологии производства высококачественных сталей с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов.

2. Развита и внедрена в работу усовершенствованный программный модуль (термодинамический модуль SyTherMa-равновесие\*) для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газа с использованием принципов термодинамики.

3. Разработаны основы технологии производства чистых сталей с применением программы SyTherMa (далее по тексту – STM) и математической модели прогнозирования температуры в промежуточном ковше при разливке каждой конкретной плавки на УНРС.

4. Разработаны и внедрены эффективные мероприятия, снижающие случаи попадания тугоплавких неметаллических включений (отложений) с внутренней поверхности разливочного стакана промежуточного ковша в слиток.

5. Определена степень влияния на чистоту стали физико-химических свойств огнеупорных материалов, применяемых в промежуточных ковшах УНРС.

6. Предложена новая интерпретация классификации чистоты стали в соответствии с современными представлениями и тенденциями по содержанию в ней общего кислорода, серы, фосфора, азота и водорода, а также введён новый термин – «суперчистая сталь».

7. Предложен новый метод мониторинга и контроля технологии производства чистых сталей в металлургической промышленности.

8. Разработан и внедрен комплекс технологических мероприятий производства чистых сталей на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла.

9. Разработан и внедрён алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей на всей технологической цепочке.

10. Разработана сквозная технология на базе комплекса предложенных мероприятий производства чистых сталей.

**Объектом исследования** являются процессы и агрегаты производства раскисленной алюминием стали высокой чистоты с повышенными требованиями по неметаллическим включениям и примесям.

---

\* Толстолицкий, А.А. SyTherMa-равновесие / А.А. Толстолицкий, Г.И. Котельников, С.А. Ботников // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669194; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2021 г.

**Предметом исследования** являются физико-химические процессы, технологические режимы, организация производства, используемое сырье и материалы, влияющие на качество стали по содержанию в ней неметаллических включений, примесей и газов в условиях современных сталеплавильных цехов.

#### **Методы исследования.**

Прямые методы исследования неметаллических включений осуществлены: на оптическом микроскопе Axio Observer.D1m, рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV, сканирующих электронных микроскопах JEOL JSM-6460LV и Ultra-55. Косвенные методы исследования неметаллических включений выполнены: методом плавления в потоке инертного газа на газоанализаторе LECO TCH-600 и методом термо-ЭДС с применением высокотемпературной электрохимической гальванической ячейки с эталонным электродом (Cr и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и с твёрдым электролитом ZrO<sub>2</sub>·(MgO). Для достижения поставленной цели и решения задач в рамках диссертации использовались следующие методы: химического, рентгенофазового и спектрального анализа для определения химического и фазового состава исходных и полученных материалов при промышленных исследованиях. Термодинамическое моделирование осуществлено в вычислительных программах для сталеплавильных процессов: STM и Thermo-Calc. Исследования влияния химического состава трубной стали на морфологию неметаллических включений выполнены путём построения ПРKM (поверхность растворимость компонентов в металле) системы Fe–Mg–Ca–Al–Mn–C–O. Статистические методы анализа данных: построение гистограмм распределения, определение уравнения линии тренда методом наименьших квадратов и вероятностно-графические модели. Методы углубленного анализа данных: дерево принятия решений, ансамбли деревьев принятия решений, ядерный метод опорных векторов, градиентный бустинг. Основным методом исследования являлось опытное опробование новых разработок в промышленных условиях, которое проводилось в АО «Выксунский металлургический завод» (АО «ВМЗ») и АО «Первоуральский новотрубный завод» (АО «ПНТЗ»).

**Теоретической основой** для данной работы послужили труды в области исследований сталеплавильных процессов и неметаллических включений в стали. В частности, публикации таких авторов, как Л.М. Аксельрод, Б.А. Баум, Г.В. Белов, Л.Н. Белянчиков, А.М. Бигеев, В.А. Бигеев, Н.А. Ватолин, А.Ф. Вишкарев, К.В. Григорович, В.А. Григорян, Ю.А. Гудим, А.П. Гуляев, А.В. Дуб, В.С. Дуб, А.И. Зайцев, Алексей Алексеевич Казаков, Александр Анатольевич Казаков, А.В. Карасев, В.А. Кожеуров, К.Л. Косырев, Г.И. Котельников, В.А. Кудрин, А.В. Куклев, А.В. Лейтес, Б.В. Линчевский, Н.П. Лякишев, Я.Н. Малиночка,

Г.Г. Михайлов, А.Н. Морозов, В.А. Мчедlishvili, А.В. Павлов, С.Н. Падерин, Д.Я. Поволоцкий, А.Г. Пономаренко, Б.А. Прудковский, В.Е. Рощин, А.М. Самарин, А.А. Сафронов, А.Е. Семин, А.Н. Смирнов, А.Я. Стомахин, Б.Х. Хан, С.А. Храпко, А.Г. Шалимов, В.И. Явойский и др. Из зарубежных авторов: S. Abraham, N. Bannenberg, J.K. Brimacombe, T. Cimorelli, L. Holappa, R. Kiessling, J.A. Kromhout, S. Kumar, K. Narita, J.C. Pires, B.G. Thomas, E.T. Turkdogan, K. Wännenberg, L. Zhang и др.

Вопросы процессов вторичного окисления металла на разливке подробно освещены в работах А.В. Куклева, А.В. Лейтеса и А.Г. Шалимова.

Вопросам одновременного контроля внешнего поступления кислорода в расплав на всей технологической цепочке уделяется недостаточно внимания. В настоящее время вопросы недостатков производства чистых сталей мало освещены в теоретических исследованиях и/или практических разработках, что определяет необходимость проведения исследований в области получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов.

**Научная новизна диссертационного исследования (соответствует пп 2, 4, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 22, 25 и 26 паспорта специальности 2.6.2).**

1. Получило дальнейшее развитие возможности уникального аппаратно-программного комплекса, в том числе, созданные программные продукты на основе искусственного интеллекта, позволяющие разрабатывать инновационные технологии производства чистых и сверхчистых сталей, обеспечивать их стабильное и эффективное функционирование в условиях реального современного сталеплавильного производства. Показано, что эффективность его работы достигнута использованием в качестве основной научной идеи положения о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ», при контроле внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Достоинство этой идеи в том, что благодаря ей обеспечивается быстрое определение критических точек в разрабатываемых и действующих технологиях, определяются эффективные способы решения возникающих проблем качества чистых и сверхчистых сталей.

2. Впервые установлено и научно обосновано предельное содержание вредных элементов в стали, раскисленной алюминием и модифицированной кальцием для соотношения оксидов кальция к алюминию от 0,6 до 1,0: общего кислорода – не более 0,0020 масс. %, серы – не более 0,0030 масс. % и магния – не более 0,0008 масс. %, превышение которых приводит к снижению качества готовой металлопродукции за счёт формирования избыточного количества неметаллических включений.

3. Посредством применения комплексного подхода к учёту поступления кислорода извне от всех возможных источников, уточнён вклад огне-

упорного материала промежуточного ковша и его физико-химических свойств в процессе общего вторичного окисления расплава при производстве высококачественной стали, раскисленной алюминием, что обеспечивает перспективу развития технологий получения сталей со сверхнизким содержанием включений.

4. В рамках разработки новой классификации чистоты раскисленной алюминием стали для промышленного применения введен новый термин «суперчистая сталь» (защищен патентом Российской Федерации), содержащей в сумме менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа (масс. %):  $[O]_{\text{общий}} \leq 0,00150 \%$ ,  $[S] \leq 0,00150 \%$ ,  $[H] \leq 0,00015 \%$ ,  $[N] \leq 0,00500 \%$ ,  $[P] \leq 0,00800 \%$ . «Суперчистая сталь» в 3 раза чище «чистой стали» по Гуляеву А.П.

5. Посредством расширенного и улучшенного мониторинга составов разливаемых средне- и низкоуглеродистых марок сталей, их газонасыщенности, чистоты по наличию  $Al_2O_3$ , технологии и технологичности процесса разливки, применительно к диапазону исходных физико-химических свойств, а именно: основности ШОС 1,04-1,25 и вязкости 0,03-0,12 Па·с, величин теплового потока через стенки кристаллизатора и их изменений в процессе разливки, были установлены условия образования продольных дефектов непрерывнолитого металла, определен механизм их формирования и предложен алгоритм корректировки сквозной технологии для минимизации образования дефектов и аварийности на УНРС.

6. Разработан и внедрен новый алгоритм корректировки технологических режимов производства высококачественной стали, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле параметров ключевых элементов всей технологической цепочки от выплавки до разливки, учитывающий взаимосвязанность работы отдельных агрегатов по решению задач получения чистой стали с заданными низкими содержаниями кислорода, серы, магния и водорода, управления качеством поверхности непрерывнолитого металла через мониторинг и оптимизацию характеристик ШОС по основности и вязкости и позволяющий разрабатывать новые технологии, а также совершенствовать имеющиеся.

7. Показаны возможности и преимущества решения задач разработки автоматизированных систем, предлагающих оптимизированные корректирующие действия по поддержанию технологии получения суперчистой стали в заданном тренде на всем её протяжении от выплавки полупродукта в сталеплавильном агрегате до непрерывной разливки, с распространением предлагаемых решений как на технологические задачи, так и на задачи обеспечения требуемой производительности работы оборудования, получения возможно низких расходов материалов и энергоносителей.

**Теоретическая значимость** работы состоит в развитии научных основ сквозной технологии получения высококачественной раскисленной алюминием стали с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов, в рамках развитого автором уникального комплекса аппаратных средств, модели расчёта взаимодействия компонентов металла, шлака и газовой фазы с целью контроля и управления окислением стали с учётом внешних потоков кислорода в металл. Предложена методика поиска и оценки критических зон в технологии поступления излишков кислорода, которая может видоизменяться и модернизироваться в будущем, что позволит расширить и развить как известные, так и дополненные данной работой подходы производства чистых сталей. Теоретические результаты работы могут быть использованы для разработки новых марок стали в приоритетных направлениях развития промышленности: машиностроении, энергетике, транспорте и др.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в том, что полученные в работе научные результаты являются основой создания современного подхода в разработке и внедрении технологии производства чистых сталей в промышленности. Предложены новые технологические решения при производстве сверхчистых сталей, позволяющие существенно снизить трудоёмкость и повысить технико-экономические показатели на металлургических предприятиях, производящих высококачественную сталь. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проектировании новых и модернизируемых сталеплавильных цехов, а также учтены при разработке базовой автоматизации мониторинга и контроля технологических параметров производства высококачественной стали. Показан новый путь применения комбинации углубленного анализа данных и традиционных методов исследований в металлургическом производстве для выявления первопричин проблем и выбора значимых технологических параметров для контроля технологии и разработки эффективных мероприятий. Удельный суммарный экономический эффект от проделанной работы на металлургическом предприятии может составить около 155,1 рублей (по курсу рубля РФ на 1 квартал 2023 г.) на 1 тонну непрерывнолитой стали за счёт снижения расхода ферросплавов и повышенного выхода годной стали. При этом не учитывается прибыль на металлургическом предприятии от ритмичной работы сталеплавильного цеха за счёт реализации комплексных мероприятий по данной работе, то есть суммарный экономический эффект будет выше.

**Реализация результатов работы.** Разработана техническая документация сквозной технологии производства чистых сталей с низким содержанием неметаллических включений, в соответствии с которой осуществляется



производство трубной стали на металлургических заводах: АО «ВМЗ» и АО «ПНТЗ». Научные и прикладные результаты работы использовались в монографии «Технология и оборудование УНРС. Производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок» и в учебном процессе «Производство чистой стали в условиях Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» (далее по тексту - ЛПК).

По результатам всего организационного проекта «чистая сталь» в АО «Выксунский металлургический завод» был получен экономический эффект 269,1 млн. рублей и в том числе достигнуто снижение отбраковки труб по дефектам сталеплавильного происхождения более чем на 45 %; снижено более чем на 1000 тонн потери металла на УНРС; снижено удельное число прорывов на УНРС в 3,5 раза; снижено содержание общего кислорода в металле в 2 раза. По результатам работы создания и внедрения математической модели прогноза температуры стали на принципах алгоритма машинного обучения было достигнуто снижение в 4,6 раза случаев разливки слябов с отклонениями от целевого диапазона по перегреву (15-30 °С). Соответствующие акты и письма предприятий приведены в диссертации.

**Достоверность и обоснованность результатов и научных выводов работы** обеспечены большим объёмом выполненных экспериментов, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов; большим количеством экспериментальных и промышленных плавок; достаточным объёмом теоретических, производственных и опытных данных; металлографическими исследованиями природы дефектов, связанных с неметаллическими включениями; количественной оценки фазового состава неметаллических включений в пробах металла и в виде отложений от разливочных стаканов УНРС; адекватностью термодинамических и математических моделей, проверенных путём сопоставления расчётных данных с результатами промышленных испытаний, а также с данными литературных источников. Полученные результаты коррелируют с ранее опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами и не противоречат современным теоретическим представлениям.

**На защиту выносятся следующие положения.**

1. Результаты анализа современного состояния технологии производства высококачественных сталей с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов.

2. Усовершенствованный и развитый термодинамический модуль программного комплекса STM для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газа с использованием принципов термодинамики, обеспечивающий оценку окисленности системы «металл-шлак-газ» и уровня внешних потоков кислорода из атмосферы, материалов и футеровки.

3. Элементы сквозной технологии производства чистых сталей, разработанные с применением STM и прогнозной модели температуры металла в промежуточном ковше УНРС.

4. Разработанные мероприятия, снижающие случаи попадания тугоплавких неметаллических включений (отложений) с внутренней поверхности разливочного стакана промежуточного ковша в слиток.

5. Степень влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша УНРС, а именно, содержания кислых оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на вторичное окисление стали, установленная с применением расчётов в STM и промышленных экспериментов.

6. Результаты классификации высококачественной стали по содержанию вредных примесей – «суперчистая сталь».

7. Созданный метод мониторинга и контроля производства чистых сталей в сталеплавильном производстве.

8. Комплекс технологических мероприятий от выплавки жидкого полупродукта до разлива и кристаллизации металла на УНРС для обеспечения производства чистых сталей.

9. Созданный алгоритм корректировки технологических режимов производства чистых сталей, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле выбранных параметров на всей технологической цепочке.

10. Разработанная технология получения чистых сталей на базе комплекса предложенных мероприятий и подхода к организации промышленного производства, охватывающая все передельные процессы получения высококачественной стали и обеспечивающая высокий выход годной металлопродукции.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на XIV Международной научной конференции (г. Сатка, 2010) «Современные проблемы электрометаллургии стали»; XV Международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Чебаркуль, 2013); Международной конференции огнеупорщиков и металлургов «Инновационные технологии. Формованные изделия и неформованные огнеупорные материалы: сырьё, производство, служба в металлургических агрегатах» (г. Москва, 2014); 6-ом Международном промышленном Форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Челябинск, 2014); 14-й Международной научно-технической конференции «Металл-2014» (г. Жлобин, Республика Беларусь, 2014); XIII Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Полевской, 2014); Конференции ЦНИИчермет им. И.П. Бардина «Металловедение, технологии и применение высокопрочных сталей и сплавов» (г. Москва, 2015); XIV Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Электросталь, 2016); Международной промышленной

конференции «Электросталь: технология, оборудование, материалы» (г. Москва, 2017); Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», имени академика А.М. Самарина (г. Москва, 2017); 2-ой Международной промышленной конференции «Электросталь: технология, оборудование, материалы» (г. Москва, 2018); XV Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Тула, 2018); XVIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Первоуральск, 2019); Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», имени академика А.М. Самарина (г. Москва, 2019); 4-ой Международной промышленной конференции «Электросталь: технология, оборудование, материалы» (г. Москва, 2020); I Международной конференции «Чистая сталь: от руды до проката - 2020» (г. Москва, 2020); XVI Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Екатеринбург, 2021); Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», имени академика А.М. Самарина (г. Выкса, 2022); XVII Международном конгрессе сталеплавильщиков (г. Магнитогорск, 2023).

**Публикации.** Всего по материалам диссертации опубликовано 51 печатная работа, в числе которых 16 в изданиях из Перечня ВАК, 10 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, один патент на изобретение и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Общая стратегия и структура работы, цели и задачи исследования определены автором. Все эксперименты и расчёты в диссертации выполнены при участии автора. Термодинамические расчёты по раскислению, легированию и шлакообразованию в сталеразливочном ковше, расчёты оценки вторичного окисления металла и другие расчёты – лично автором. Автору принадлежит анализ и интерпретация результатов, формулировка научных основ разработки комплексной технологии производства чистых сталей, основных положений и выводов. Автором диссертации запатентован новый термин «суперчистая сталь». Творческим вкладом в развитие термодинамического модуля программного комплекса STM является промышленное опробование, настройка вычислений и организация работы по внесению в базу данных программы новых материалов, которые были перепроверены в сертифицированных лабораториях.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, содержащего основные выводы и результаты исследований, списка литературы из 442 наименований и 8 приложений. Общий объём работы составляет 438 страниц, в том числе основного текста – 358 страниц. Работа содержит 80 рисунков, 45 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность общего направления диссертационной работы, исходя из перспективы и важности дальнейшего развития производства высококачественной стали с низким содержанием неметаллических включений, вредных примесей и газов в современной металлургической отрасли России.

**В первой главе «Состояние технологии современного производства высококачественных сталей с низкой концентрацией включений и газов»** приведен аналитический обзор научно-технической литературы о состоянии современной технологии производства высококачественных сталей с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов. Рассмотрены современные представления о чистоте стали и приведен обзор ранее опубликованных результатов получения и производства такой стали как в России, так и за рубежом. На основе материалов исследований автора, приведенных в главе 1, сформулированы цель и задачи настоящего диссертационного исследования, представленные во введении.

**Вторая глава «Вычислительная термодинамика и цифровизация для разработки технологии производства чистых сталей»** посвящена развитию и применению вычислительной термодинамики и цифровых технологий для пирометаллургических процессов и разработки технологии производства высококачественной стали. Литературный обзор, представленный в начале главы, показал о наличии множества вычислительных программ для расчёта термодинамического равновесия, применяемых в металлургии: ГИББС, ИВТАНТЕРМО, ТЕРРА, FactSage, MPE, MTDATA, Thermo-Calc и др. Эти программы для современных сталеплавильных производств можно применять, но с некоторыми ограничениями для промышленных расчётов и оперативного внесения изменяющихся материалов и их химического состава. Поэтому для эффективной разработки технологии производства чистых сталей была поставлена задача развитие эффективного программного инструмента для термодинамических расчётов металлургических процессов, происходящих в реальных системах: сталеразливочный ковш, промежуточный ковш и кристаллизатор УНРС.

С группой разработчиков был создан и развит уникальный комплекс интеллектуальных и аппаратных средств – программный комплекс SyTherMa-равновесие (STM), позволяющий рассчитывать и разрабатывать как обычную технологию выплавки стали, так и инновационные технологии получения чистых сталей. Показано, что в качестве основной научной идеи созданного комплекса эффективно работает положение о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ» и контроле внеш-

него поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Эта идея обеспечивает быстрое определение критических точек нежелательного окисления стали в разрабатываемых и действующих технологиях.

Программа STM предназначена для расчёта термодинамического равновесия в системе «металл-шлак-газовая фаза» в сплавах на основе Fe, Ni, Cr и Cu. В отличие от известных аналогов моделирования термодинамического равновесия, программа STM специально сделана для расчёта сталеплавильной части в жидком состоянии. Химические составы часто применяемых материалов на предприятиях чёрной металлургии России были перепроверены в сертифицированных лабораториях и внесены в базу программы STM. Также была расширена база констант образования химических соединений для промышленных термодинамических расчётов на основе железа с учётом разной валентности и фаз (до 85 компонентов).

В программе STM приняты следующие стандартные состояния для: металла – чистые компоненты в состоянии бесконечно разбавленного раствора (ЧКБРР); шлака – жидкое состояние; газа – идеальный газ. Для промышленных объектов расчёт коэффициентов активности металла в программе STM проводили с использованием параметров взаимодействия Вагнера, а расчёт коэффициентов активности шлака по теории регулярных ионных растворов Кожеурова В.А. (ТРИР).

Для проверки адекватности расчётов в программе STM в главе 3 выполнено шесть вычислительных экспериментов.

С целью решения задачи по разработке технологии производства чистых сталей с применением математической модели прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше при разливке каждой конкретной плавки на УНРС был применён новый комбинированный подход совершенствования технологии производства стали с использованием методов углубленной аналитики и машинного обучения с применением подходов обработки «больших данных».

Разработана модель прогнозирования температуры металла в заданном интервале перегрева над температурой ликвидус в промежуточном ковше УНРС в зависимости от последнего замера температуры в сталеразливочном ковше перед разливкой с учётом истории эксплуатации ковша и фактического процесса внепечной обработки стали. Предложено осуществлять прогноз температуры перегрева металла в условиях ЛПК, применяя статические модели и учитывая технологию всего процесса. По результатам работы создания и внедрения данной модели было достигнуто снижение в 4,6 раза случаев разлива слябов с отклонениями от целевого диапазона по перегреву (15-30 °С) в сравнении со средним уровнем этого показателя до начала проведения работы. Также был выявлен перечень релевантных технологических

параметров, который был учтён для разработки технологии «суперчистая сталь».

Третья глава «Анализ комплекса мероприятий производства высококачественной стали» посвящена анализу всего комплекса мероприятий производства и разработки технологии чистых сталей с использованием дополнительных инструментов: элементы математических, термодинамических моделей, прогнозные и статические модели, построенные с применением физико-химических основ, технологии машинного обучения и больших данных.

### **STM расчёт № 1. Оценка поступления кислорода извне в металл по всей технологической цепочке**

Необходимо обеспечить контроль и недопущение поступления кислорода извне в металл на всех производственных этапах. Расчётным путём с использованием программы STM для различных агрегатов были установлены равновесные возможные суммарные граничные диапазоны поступления кислорода в металл в кг/т жидкой стали с учётом взаимодействия всех компонентов металла, шлака и газа одновременно (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Расчётное поступление кислорода извне в металл и фактические диапазоны содержания в металле кислорода, серы и магния на всех производственных этапах

Параметр и элемент в жидкой стали	Выпуск плавки в сталеразливочный ковш из сталеплавильного агрегата (электродпечь или конвертер)	Внепечная обработка стали включая модифицирование кальцием	Разливка стали на УНРС		
			Участок «промежуточный ковш»	Участок «кристаллизатор»	
Расчёт в STM кислорода O <sub>2</sub> извне в металл, кг/т	1,000-5,500	0,100-4,500	0,005-0,100	0,001-0,080	
Промышленные данные, масс. %	[O] <sub>раст.</sub>	0,03000-0,12000	0,00010-0,00700	0,00012-0,00045	0,00013-0,00050
	[O] <sub>оксиды</sub>	0,00500-0,01000	0,00040-0,00300	0,00048-0,00300	0,00050-0,00350
	[O] <sub>общий</sub>	< 0,13000	< 0,01000	0,00060-0,003450	0,00063-0,00400
	[S]	0,0150-0,0400	0,0005-0,0070	0,0008-0,0050	
	[Mg]	0,0010-0,0030	0,0005-0,0015	0,0002-0,0010	

Следует принимать во внимание в комплексе всю технологию и все процессы, то есть необходимо учитывать сквозной расчёт всей цепочки. Для достижения поставленной задачи, предложено разделить и рассматривать отдельно по следующим процессам: 1) выпуск плавки в сталеразливочный ковш; 2) внепечная обработка на УКП и вакууматоре; 3) ввод в металл алюминия, кальция и модифицирующая обработка включений; 4) защита металла от вторичного окисления во время разливки; 5) технологичность взаимодействия шлака со сталью в кристаллизаторе УНРС. При этом результаты

расчета предыдущего этапа являются входными данными на последующий. Тем самым обеспечивается непрерывность и целостность всей цепочки.

Из таблицы 1 видно, что самое значительное поступление кислорода в жидкую ванну соответствует первым двум производственным этапам: выпуск плавки и внепечная обработка стали. На этих производственных этапах в первую очередь следует реализовывать эффективные мероприятия, снижающие процессы вторичного окисления металла.

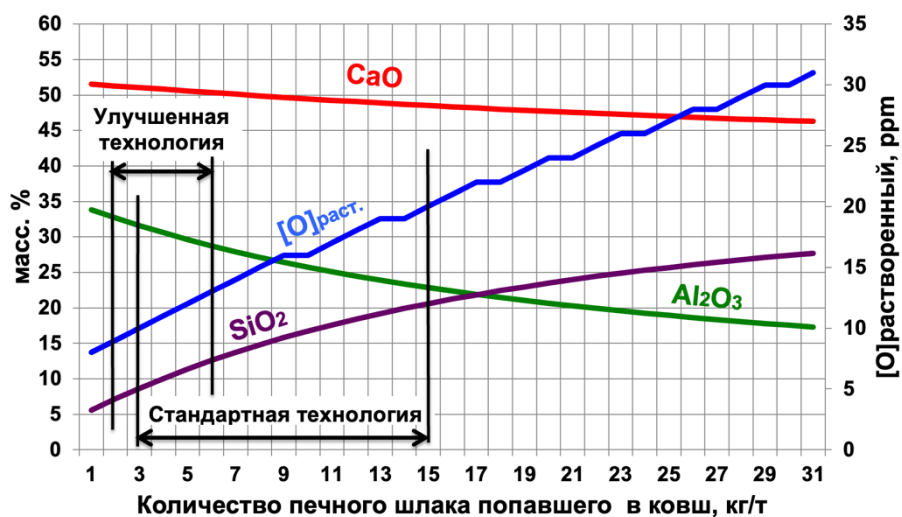
*Выводы по STM расчёту № 1.* Предложенный комплексный подход оценки поступления кислорода в расплав металла позволяет определять проблемные участки в технологии для разработки эффективных мероприятий и корректирующих действий в сталеплавильном цехе, а также осуществлять адекватную оценку реализованных мероприятий в сталеплавильном цехе. Поступление кислорода извне по технологической цепочке может составлять для этапа: выпуска плавки от 0,880-1,000 до 5,500 кг/т; внепечной обработки стали – от 0,100 до 4,500 кг/т; участок разливки «промежуточный ковш» – от 0,005 до 0,100 кг/т; участок разливки «кристаллизатор» – от 0,001 до 0,080 кг/т. На внепечной обработке стали следует обеспечивать настройку пятна продувки как по визуальным признакам, так и по приборам учёта потока газа на продувочные узлы (расходомерами). При разливке чистых сталей на УНРС следует в режиме реального времени контролировать следующие параметры процесса вторичного окисления: прирост азота, изменения химического состава по Al, Si, Mn, N, Al<sub>окс</sub>, изменения физико-химических свойств ШОС в кристаллизаторе и образование поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле.

### **STM расчёт № 2. Выпуск плавки из сталеплавильного агрегата**

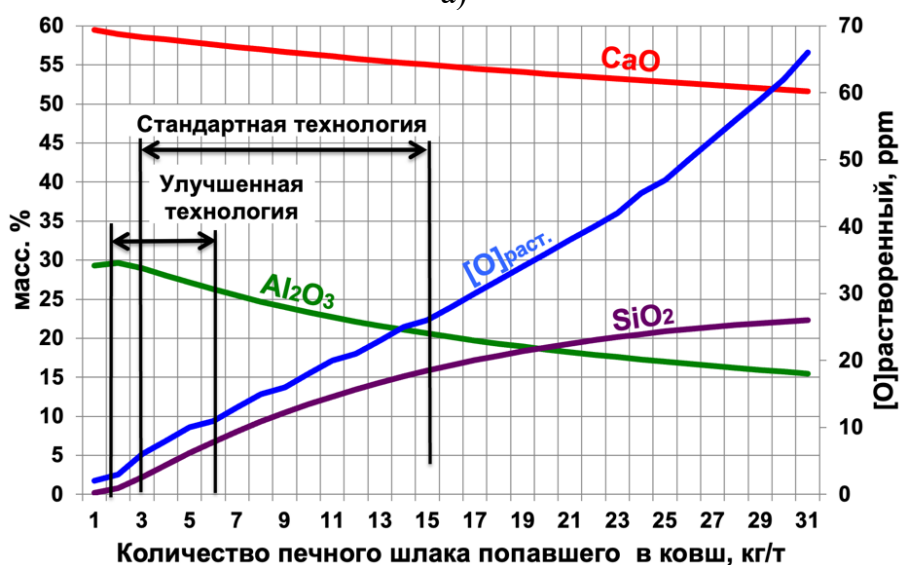
В комплексе были учтены технологические процессы раскисления и шлакообразования в сталеразливочном ковше, попадания окисленного печного шлака в ковш с применением материальных и термодинамических расчётов с использованием программы STM. Это позволило разработать и внедрить отдельную схему ввода материалов из разных промежуточных бункеров на выпуске плавки с одновременной корректировкой химического состава шлака. Обычно материалы отдаются в ковш из одного бункера и без учёта марочного сортамента. Кроме этого, с целью получения жидких шлаков в ковше следует выполнять одновременную корректировку расхода раскислителей и шлакообразующих материалов на выпуске плавки.

Выбраны целевые значения по содержанию в ковшевом шлаке оксидов с целью получения температуры плавления его от 1455 до 1470 °С:  $\text{CaO/SiO}_2 \geq 5,0$ ;  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3 \leq 1,9$ ;  $\text{SiO}_2 \leq 10$  масс. %;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 24$  масс. %. Произведено термодинамическое моделирование в программе STM попадания печного шлака от 1 до 31 кг/т в сталеразливочный ковш, с целью определе-

ния изменения его химического состава для трубной низкоуглеродистой стали класса прочности К56 и трубной среднеуглеродистой стали 20. В расчётах учтена фактическая технология ввода раскислителей, легирующих и шлакообразующих материалов в сталеразливочный ковш для условий ЛПК. На рисунке 1 представлены расчёты в STM.



а)



б)

Рисунок 1 – Изменение состава шлака в ковше и содержание растворенного кислорода  $[O]_{\text{раств.}}$  в металле в зависимости от количества попавшего печного шлака для низкоуглеродистой К56 (а) и среднеуглеродистой стали 20 (б)

Снижение количества печного шлака, попадающего в металл не более 6,0 кг/т (цель – не более 2,0-3,0 кг/т), стабилизирует получение необходимого ковшевого шлака по химическому составу, который можно оптимизировать на внепечной обработке стали за короткий промежуток времени.

Выводы по STM расчёту № 2. Установленные оптимальные расходы материалов на выпуске плавки позволили улучшить технологический про-



цесс производства стали на выпечной обработке с получением экономии материалов, ресурсов и высокого выхода годной стали. Выполненные расчёты и работы по оптимальному выпуску плавки для стали, раскисленной алюминием, из сталеплавильного агрегата позволили разработать следующие мероприятия и рекомендации: 1 – выпуск плавки следует осуществлять с применением отдачи материалов через три бункера (первый бункер – для отдачи алюминия, второй – ферросплавов; третий – шлакообразующих материалов), а не через один или два; 2 – в качестве раскислителя алюминия применять литой алюминий по ГОСТ 295 вместо ферроалюминия брикетированного; 3 – предварительное раскисление наиболее эффективно выполнять с использованием комплексного раскисления алюминием совместно с карбидом кальция ( $Al+CaC_2$ ); 4 – учёт попадания окисленного сталеплавильного шлака в ковш необходимо осуществлять по таким показателям как жидкий остаток в сталеплавильном агрегате, так и диаметр, дизайн сталевого отверстия (эркера или лётки).

### **STM расчёт № 3. Оптимизация химического состава шлака в сталеразливочном ковше**

Разработаны и реализованы следующие мероприятия для получения оптимального состава шлака в ковше с достаточной сульфидной ёмкостью ( $C_s \sim 0,0127$ ): улучшение комплексного первичного раскисления полупродукта алюминием и карбидом кальция ( $Al$  и  $CaC_2$ ); отдельный ввод материалов на выпуске плавки в ковш; интенсивная продувка металла аргоном на все пробки около 6,0 л/т·мин на печном сталеводе не менее 3 минут; исключение раскисления шлака в ковше карбидом кремния ( $SiC$ ); улучшение десульфурации в ковше за счёт раскисления шлака алюминиевыми гранулами; исключение в технологии шлакообразования материалов, повышающих в шлаке содержание  $SiO_2$  (флюорит  $CaF_2$ , карбид кремния  $SiC$  и теплоизолирующие смеси на основе кремнезёма). Промышленная практика работы на улучшенном шлаке в сталеразливочном ковше показала следующие преимущества: на протяжении всего периода выпечной обработки шлак в ковше жидкий и не требует добавления флюорита; шлак с высокой основностью  $CaO/SiO_2$  и с содержанием  $SiO_2 \leq 10$  масс. % менее активен к алюминию в металле, то есть минимальный процесс окисления алюминия с образованием избытка  $Al_2O_3$ ; низкая эрозия (износ) футеровки сталеразливочного ковша за счёт исключения применения флюорита и получения «комфортного» шлака для периклазовых огнеупоров ( $MgO-C$ ); снижение расхода алюминиевой катанки.

Расчёт происходит по материалам, которые необходимо ввести в ковш согласно действующей технологии. Оптимизация идёт (поиск лучшего решения) по минимуму цены легирования и раскисления, при достижении за-

данных условий раскисления: ограничения по химическому составу металла и шлака, по массе шлака и использованию материалов. В случае невозможности найти оптимальное решение в расчёте программа сообщит, что заданные данные следует изменить.

Кроме общеизвестных технологических приёмов получения чистых сталей, существует необходимость учитывать поступление в металл магния [Mg] и оксида магния (MgO) в шлак из футеровки ковшей. Практически во всех современных сталеплавильных цехах применяют футеровку сталеразливочного и промежуточного ковшей, в состав которой входит MgO, поэтому в металле обычно обнаруживаются включения с магнием и/или магнезиальной шпинелью (MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Отрицательное воздействие магния (шпинели) в металле для электросварных труб – это негативное влияние на качество сварного шва, а для бесшовных труб – ухудшение эксплуатационных свойств, например, стойкость к коррозии.

Концентрация MgO более 9-11 масс. % в ковшевом шлаке, выдерживаемая на некоторых предприятиях для насыщения шлака, может влиять негативно на обеспечение производства чистых сталей и качества металлопродукции. Шлак с высоким содержанием MgO в контакте со сталью с низким содержанием растворенного кислорода (менее 0,0002 масс. %) приводит к увеличению концентрации [Mg] в стали с формированием тугоплавкой магнезиальной шпинели (MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Содержание растворенного магния увеличивается с повышением растворенного алюминия, что приводит к формированию нежелательного оксида MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Содержание магния в металле также зависит от основности шлака (CaO/SiO<sub>2</sub>) в сталеразливочном ковше и концентрации в нём MgO. В таком случае, совершенствование технологии по минимизации образования магнезиальной шпинели выглядит следующим образом: в шлаке повышать концентрацию Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и не использовать материалы с повышенным содержанием MgO; в металле минимизировать концентрацию растворенного алюминия [Al] и не применять материалы с повышенным содержанием магния. Также снижение времени нахождения металла в сталеразливочном ковше благоприятно сказывается на минимизацию формирования магнезиальной шпинели (MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

В условиях ЛПК, с целью стабилизации технологии получения чистых сталей, под руководством автора диссертации были внедрены следующие мероприятия: контроль использования новых ковшей, а также отслеживание ковшей на стендах под горелкой без металла более 5 часов за счёт внедрения электронной системы сбора данных; для новых ковшей осуществляется корректировка химического состава шлака по снижению содержания MgO за счёт увеличения расхода извести и флюса на выпуске плавки из печи;

с целью оперативной корректировки формирующего шлака на ковше-печи на постоянной основе необходим контроль химического состава всех используемых шлакообразующих материалов и состава шлака на каждой плавке; внедрена цифровая система сбора данных по огнеупорам сталеразливочных ковшей; работу продувочных фурм в ковшах следует осуществлять на непрерывном контроле со стороны персонала цеха; технологический и вспомогательный персонал цеха максимально быстро и эффективно устраняет все возможные причины неудовлетворительной продувки в ковше.

Выполненный ряд мероприятий с учётом всех технологических аспектов производства чистых сталей в сталеразливочном ковше позволил сузить рабочие границы основности ковшевого шлака ( $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ ) с 1,2-2,2 до 1,3-1,8, а также стабилизировать границы концентрации в шлаке MgO с 4,0-12,0 масс. % до 4,5-8,5 масс. %. Кроме этого, было отмечено, что для металлопродукции, произведенной на новых сталеразливочных ковшах с номером оборотов «1», «2» и «3», был снижен уровень дефектов в трубе, связанных с неметаллическими включениями, в состав которых входит MgO.

*Выводы по STМ расчёту № 3.* Комплексный подход расчёта шлакообразования в сталеразливочном ковше позволил одновременно оптимизировать технологию на выпуске плавки и на внепечной обработке с учётом влияния на качество производимой стали. С целью минимизации образования магнезиальной шпинели рекомендуется в шлаке повышать концентрацию  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и не использовать материалы с повышенным содержанием MgO, а в металле минимизировать концентрацию растворенного алюминия [Al] и не применять материалы с повышенным содержанием магния. Выполненные расчёты выше и работы по оптимизации состава шлака в сталеразливочном ковше позволили разработать очередные мероприятия и рекомендации для производства чистых сталей, раскисленных алюминием: 1 – исключить карбид кремния (SiC) полностью из технологии; 2 – исключить применение флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) в качестве разжижителя шлака; 3 – обеспечить цифровой учёт оборота сталеразливочных ковшей и их обслуживание с контролем содержания в шлаке оксида магния (MgO) и основности  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ ; 4 – оптимизацию шлака также выполнять в сторону уменьшения его толщины (до 90-130 мм) и количества в сталеразливочном ковше, так как это напрямую влияет на экономию электроэнергии на нагрев и снижение расхода извести на УКП и сохранение качества стали одновременно; 5 – продувка расплава и шлака в ковше должна продолжаться после выпуска плавки в течение не менее 2-3 минут; 6 – следует реализовывать следующий подход технологии наведения шлака в ковше: основные навески материалов отдаются на выпуске, а корректирующие навески для точной настройки химического состава шлака выполнять на внепечной обработке.

#### **STM расчёт № 4. Критическое поступление кислорода извне во время разливки на УНРС, влияющее на оптимальное модифицирование включений кальцием**

Практически на всех металлургических предприятиях решен вопрос модифицирования стали кальцием и достигнут оптимум, но время от времени возникают проблемы как с недостаточным содержанием кальция в расплаве из-за несовершенства действующей технологии, так и с необходимостью соблюдения требований к заказу по отношению Ca/S (более 1,0...1,5), то есть введение излишнего кальция в жидкий металл. Несмотря на то, что процесс хорошо изучен, тем не менее адаптация процесса модифицирования металла кальцием к конкретным условиям, агрегатам и, даже, к конкретной плавке до сих пор актуальна в мировой металлургии и является основанием для проведения дополнительных исследований. Для отношения кальция к алюминию с целью модифицирования необходимо учитывать оксидную составляющую по алюминию.

На производственной практике содержание  $Al_2O_3$  в металле может колебаться в широких диапазонах на каждой плавке от 0,0005 до 0,0050 масс. % и более. Расчётным путём в STM было подтверждено, чем больше в металле содержание растворенного алюминия (не связанный с кислородом и азотом – [Al]), тем выше активизация процессов поступления кислорода в расплав извне из-за вторичного окисления (см. таблицу 2), то есть необходимо стремиться выдерживать в металле алюминий на нижнем допустимом пределе.

Таблица 2 – Расчётное поступление кислорода извне и процентное окисление алюминия для различного начального содержания алюминия и одинаковых условий по шлаку

Начальное содержание [Al], масс. %	% потери алюминия из-за окисления через шлак	Поступление кислорода $O_2$ в металл, кг/т
0,005	66,0	0,05
0,015	88,0	0,16
0,025	92,8	0,25
0,035	94,9	0,35
0,045	95,8	0,44
0,055	96,5	0,60

Исходные данные для расчёта в STM:  
 $T=1555\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; вес металла (сталь 20) – 15 т; вес шлака ( $SiO_2$  – 40 масс. %) – 1 т

На рисунке 2 представлена фазовая тройная диаграмма CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для содержания MgO 5 масс. % и обозначены области химического состава шлака «до» для 1485 плавов и «после» для 968 плавов – улучшенная технология производства стали с низким содержанием включений

( $[O]_{\text{общий}}=0,0008-0,0025$  масс. % и  $[S]=0,0028$  масс. %). В таблице 3 представлен типовой химический состав этих шлаков в сталеразливочном ковше, а в таблице 4 химический состав металла этих плавок в промежуточном ковше УНРС.

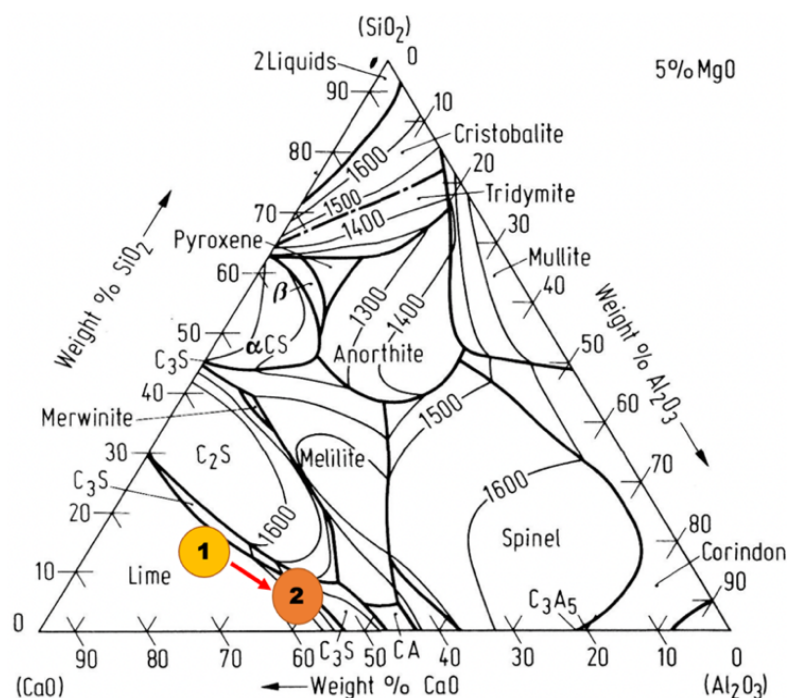


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для содержания MgO – 5 масс. %; 1) – технология «до» и 2) – технология «после»

Таблица 3 – Химический состав шлака в сталеразливочном ковше и расчёты оптической основности шлака ( $\Lambda$ ) и сульфидной ёмкости шлака ( $C_s$ )

Сталь 20	Химический состав шлака в сталеразливочном ковше, масс. %							Расчёт выполнен по формулам Соммервилль И.Д. и Накамура Т.	
	(CaO)	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(SiO <sub>2</sub> )	(MgO)	(FeO)+(MnO)	CaO/SiO <sub>2</sub>	CaO/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	( $\Lambda$ )	( $C_s$ )
Вариант 1 – «До»	61,4	15,9	12,8	4,8	0,8	4,8	2,1	0,787	0,0187
Вариант 2 – «После»	53,5	28,6	7,0	6,6	1,0	7,6	1,5	0,775	0,0127

Ионная форма кислорода в шлаке является определяющим фактором физико-химического поведения шлака. Количество свободных ионов O<sup>2-</sup> в шлаке является основным показателем основности шлака и выражается через оптическую основность ( $\Lambda$ ) и её расчётные значения приведены в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что для улучшенной технологии «после» сульфидная ёмкость снизилась с 0,0187 до 0,0127, но при этом не повлияла на качество металла и металлопродукции по максимальному допустимому

содержанию серы (не более 0,003 масс. %), а также общее содержание оксидов было снижено. Следует отметить, что оптическая основность шлака ( $\Lambda$ ) осталась на высоком уровне (0,775) и была обеспечена необходимая десульфурация в сталеразливочном ковше.

Таблица 4 – Содержание в промежуточном ковше серы, кальция, общего алюминия, общего кислорода, магния и отношений  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}/[\text{O}]_{\text{общий}}$  с указанием стабильности разливки на УНРС

Сталь 20	Химический состав металла в промежуточном ковше УНРС, масс. %					Ca/Al	CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca/[O] <sub>общий</sub>	Стабильность разливки на УНРС
	[S]	[Ca]	Al <sub>общий</sub>	[Mg] расчётный в STM	[O] <sub>общий</sub>				
Вариант 1 – «До»	0,0010-0,0050 Сред. ~ 0,0015	0,0015-0,0045 Сред. ~ 0,0025	Сред. ~ 0,0298	0,0009-0,0010	0,0010-0,0035	0,09	2,31	1,1	Стабильная разливка на 50-60 % исследуемых плавов
Вариант 2 – «После»	10-60 Сред. ~ 28	5-25 Сред. ~ 13	Сред. ~ 0,0200	0,0006-0,0008	0,0008-0,0025	0,07	0,90	0,7	Стабильная разливка на 90-95 % исследуемых плавов

Согласно работам Pires J. C. и Vannenberg N. отношения  $\text{Ca}/[\text{O}]_{\text{общий}}$  до значений 0,6 обеспечивает хорошую разливаемость на УНРС раскисленную алюминием стали. Для варианта 1 отмечалось не прогнозируемая разливка стали на УНРС, как без замечаний на 50-60 % плавов, так и со значительным затягиванием огнеупорной разливочной металлопроводки промежуточного ковша тугоплавкими оксидными соединениями ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и др.), а также их попаданием в слиток. Улучшенная технология (вариант 2) обеспечила удовлетворительную и стабильную разливку стали на УНРС почти на 95 % плавов и при этом отношение  $\text{Ca}/[\text{O}]_{\text{общий}} = 0,7$ . Основной причиной нестабильности разливки стали на УНРС для обоих вариантов – это неконтролируемое поступление кислорода извне в расплав металла. Для обеспечения оптимальной разливки металла на УНРС без затягивания рекомендуется не превышать содержание общего кислорода более чем на 0,0020 масс. %.

Расчётным методом в программе STM для промышленных плавов было установлено, что поступление кислорода в металл более 14 грамм на тонну жидкой стали на участке «сталеразливочный-промежуточный ковш» приводит к затягиванию разливочных стаканов тугоплавкими включениями и состав их преимущественно соответствует диапазону отношению  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  менее 0,60.

При повышении в металле серы более 0,0030-0,0050 масс. % формируются нежелательные сульфиды кальция (CaS) и при концентрации в металле магния более 0,0008-0,0010 масс. % – магнезиальная шпинель ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ). На основании этого были рекомендованы следующие ограничения в металле:  $[S] \leq 0,0030$  масс. % и  $[Mg] \leq 0,0008$  масс. %. Количество включений  $MgO \cdot Al_2O_3$  управляется химическим составом шлака и чистотой применяемых материалов. На рисунке 3 представлены практические данные по отношению  $CaO/Al_2O_3$  в промежуточном ковше на двойной диаграмме  $CaO-Al_2O_3$ . В процентах представлено количество плавок, попавших в отношение  $CaO/Al_2O_3$  на диаграмме  $CaO-Al_2O_3$  для обоих вариантов.

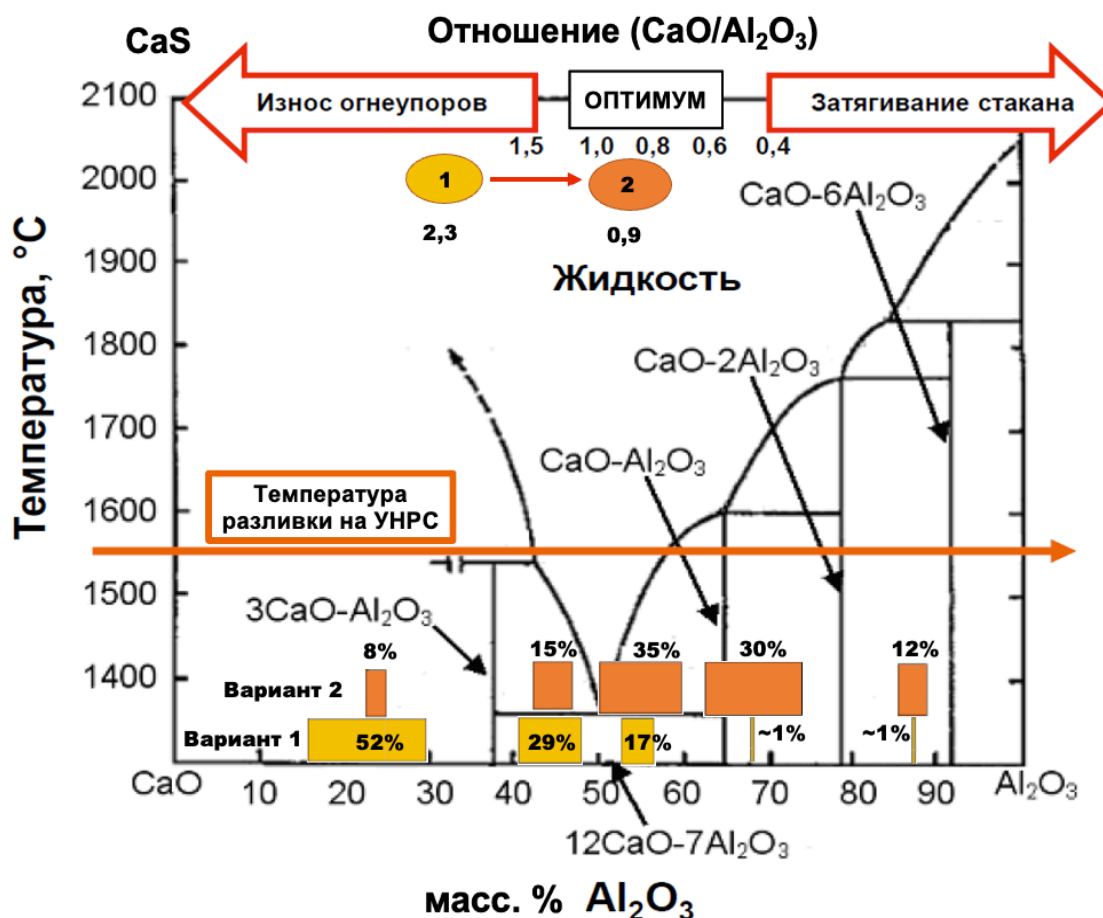


Рисунок 3 – Влияние улучшенной технологии выплавки и внепечной обработки стали на состав включений в промежуточном ковше УНРС и оптимальный диапазон отношений  $CaO/Al_2O_3$ ; 1) – технология «до» и 2) – технология «после»

Во время разливки металла на УНРС необходимо блокировать поступление кислорода извне в металл до уровней не более 0,010-0,014 кг/т с целью минимизации формирования нежелательных и трудноудаляемых алюминатов кальция в промежуточном ковше:  $CaO \cdot 6Al_2O_3$  и  $CaO \cdot 2Al_2O_3$ . В таком

случае % плавков стремится к отношениям  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  от 0,6 до 1,0 и стабильность разливки на УНРС будет выше.

### ПРКМ системы Fe–Mg–Ca–Mn–Al–O–C

Кроме расчётов STM дополнительно были построены поверхности растворимости компонентов в металле (ПРКМ) системы Fe–Mg–Ca–Al–Mn–C–O. Для исследования влияния содержания остаточного кальция на морфологию образующихся включений проведён расчёт при концентрациях, характерных для технологий модифицирования трубной стали 20 и стали 09Г2С –  $[\text{Ca}] = 0,0020; 0,0025; 0,0030$  масс. % и температуре 1560 °С.

На рисунке 4 приведены рассчитанные изотермические изосоставные сечения ПРКМ системы Fe–Mg–Ca–Mn–Al–O–C для соотношения компонентов, характерных для стали марки 20, а на рисунке 5 для стали марки 09Г2С. В каждой из области отображены составы металла, равновесного с одной оксидной фазой: в области I – с оксидным расплавом (О.р.); в области II – с корундом; в областях III и IV – с гекса- и биалюминатом соответственно; в области V – с твёрдым раствором шпинелей  $[\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3, \text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3]$  (Тв. р. шп.); в области VI, которая перпендикулярна плоскости рисунка и показана в виде линии, – с газовой фазой переменного состава, состоящей из Mg и Ca со следами CO, CO<sub>2</sub>.

Анализ представленных рисунков 4 и 5 показывает, что принципиальных различий по составу и морфологии ожидаемых НВ не наблюдается, что позволяет экстраполировать полученные данные на весь класс экономнолегированных марганецсодержащих трубных сталей. Из рисунков также следует, что образование жидких неметаллических включений возможно при высоких концентрациях кальция на уровне предела растворимости. Повышение содержания алюминия в жидком металле снижает вероятность образования жидких включений. Видно, что в предлагаемых условиях образуется в основном биалюминат кальция (область IV –  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ). При высоких концентрациях магния (3–10 ppm), низких содержаниях кальция возможно образование твёрдого раствора на основе магнезиальной шпинели (область V – Тв. р. шп.). В реальных условиях при температуре 1560 °С достаточно высокое содержание растворённого в металле магния в стали недостижимо, при этом общий магний может быть достаточно высоким. Тем не менее включения шпинельного типа обнаруживаются в металле, что может свидетельствовать о внешних источниках образования такого рода включений (шлак, огнеупоры и т. д.). Следует отметить, что в металлургической практике при содержании растворённого кислорода больше 2,0 ppm (по факту около 2,5 ppm и максимум 3–4 ppm) в промежуточном ковше УНРС обнаруживаются неметаллические включения следующих типов: корунд (область II –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), гексаалюминаты кальция (область III –



CaO·6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Это может свидетельствовать о снижении концентрации свободного кальция в расплаве до уровня менее 10 ppm и ниже в результате процессов вторичного окисления расплава. Таким образом, для оптимизации производства стали необходимо исключить попадание в зону III или V и стремиться создать условия для попадания в область IV. Для этого целесообразно организовать мероприятия по блокированию поступления кислорода извне, а также оптимизировать содержание кальция (снизить с 0,0030 до 0,0020-0,0025 масс. %) и алюминия (снизить с 0,030 до 0,025 масс. %).

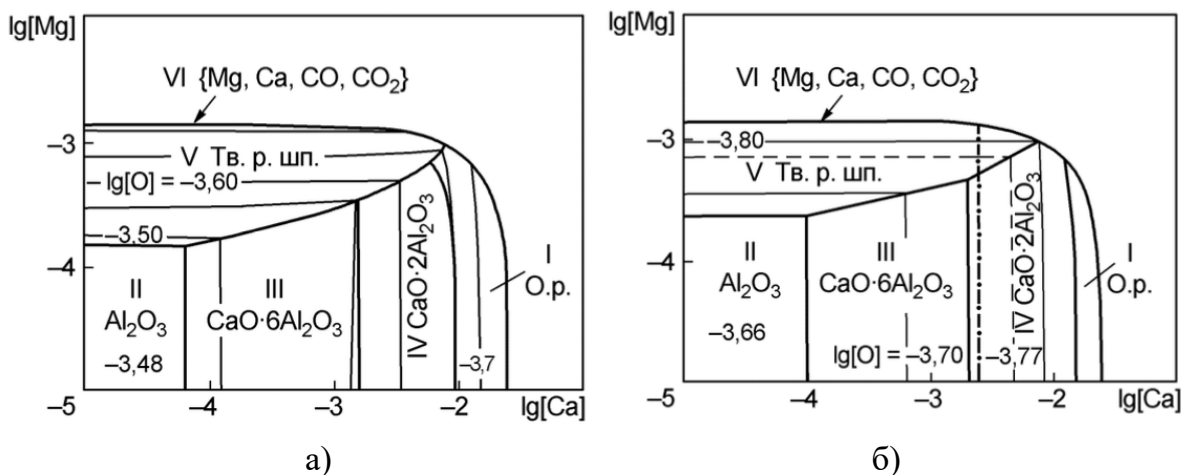


Рисунок 4 – ПРKM системы Fe-Mg-Ca-Al-Mn-C-O, P<sub>общ</sub> = 1 атм, [Mn] = 0,4 масс. %, [C] = 0,18 масс. %, T = 1560 °C (сталь 20): —●— [Ca] = 0,0020 масс. %; а) [Al] = 0,015 масс. %; б) [Al] = 0,030 масс. %

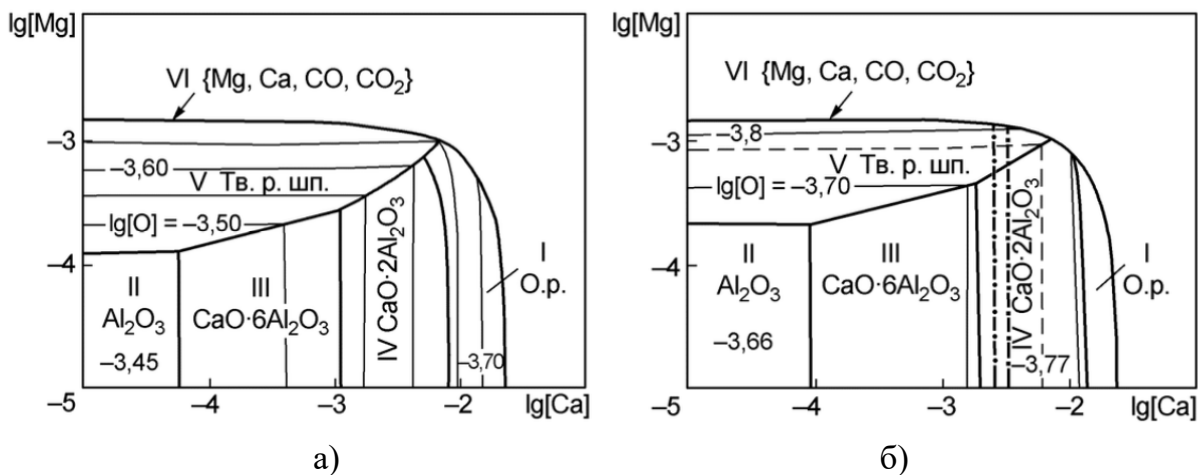


Рисунок 5 – ПРKM системы Fe-Mg-Ca-Al-Mn-C-O, P<sub>общ</sub> = 1 атм, [Mn] = 1,3 масс. %, [C] = 0,06 масс. %, T = 1560 °C (сталь 09Г2С): —●— [Ca] = 0,0025 масс. %; —■— [Ca] = 0,0030 масс. % а) [Al] = 0,015 масс. %; б) [Al] = 0,030 масс. %

Выводы по STM расчёту № 4 и построенной ПРKM системы Fe-Mg-Ca-Mn-Al-O-C. Оценку эффективности технологии производства стали с низким содержанием включений рекомендуется осуществлять через контроль стабильности разлива металла на УНРС за счёт внедрения в работу

компьютерных автоматических программ слежения за позиционированием стопора. Для оптимизации процесса разлива на УНРС необходимо обеспечивать содержание кальция от 0,0020 до 0,0025 масс. % и алюминия не более 0,0250 масс. %, а также предотвращать возможное вторичное окисление металла, поступление кислорода извне в расплав металла до уровней не более 0,010-0,014 кг/т и стремиться снижать магний в металле с целью минимизации формирования нежелательных и трудноудаляемых алюминатов кальция и магния в промежуточном ковше.

#### **STM расчёт № 5. Изменения, происходящие в шлаке промежуточного ковша при серийной разливке на УНРС (окисление через шлак)**

Необходимо сохранить полученную чистоту стали по включениям в сталеразливочном ковше и во время разлива на УНРС, то есть в промежуточном ковше. Одним из основных источников загрязнения металла оксидными неметаллическими включениями является вторичное окисление стали при её движении от сталеразливочного ковша до кристаллизатора УНРС. Ко вторичному окислению относится взаимодействие расплава с кислородом воздуха, взаимодействие со шлаком промежуточного ковша и огнеупорами.

При разливке на УНРС чистых сталей (по оксидным неметаллическим включениям с содержанием общего кислорода менее 0,0020 масс. %, раскисленная алюминием), подверженных активным процессам вторичного окисления, которые рекомендуется устанавливать по следующим 7-ми признакам: прирост концентрации азота; анализ изменения содержания химических элементов в стали (Al, Si, Mn); объёмная доля неметаллических включений; содержание общего кислорода в сталеразливочном и промежуточном ковшах; связанный алюминий с кислородом ( $Al_2O_3$ ) в пробе металла как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах; химический состав шлака в промежуточном ковше во время серийной разлива (концентрация MnO и  $SiO_2$ ); изменения свойств шлакообразующей смеси в кристаллизаторе, влияющие на качество поверхности литого металла, то есть на поверхности металлопроката могут обнаруживаться дефекты металлургического происхождения, чаще всего плена. Из представленных способов оценки процесса вторичного окисления металла на УНРС нет одного универсального. Поэтому рекомендовано применять все или несколько способов одновременно.

На производстве затруднительно провести отдельную оценку влияния процессов вторичного окисления на образование оксидных неметаллических включений в промежуточном ковше, так как присутствуют другие значимые процессы, которые имеют значительное влияние на загрязнение металла. Например, износ огнеупоров, захват покровного шлака в расплав, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш и др. Поэтому были выполнены материальные и термодинамические расчёты в программе STM поступления

кислорода через шлак в металл. Также были оценены степени влияния окисления металла через воздух, шлак и футеровку на УНРС по имеющимся данным химического состава металла и содержания растворенного кислорода в промежуточном ковше, измеренного методом термо-ЭДС.

Термодинамические расчёты в STM показывают возможность протекающих реакций окисления алюминия, марганца и восстановления кремния шлака, содержащего оксид кремния. При увеличении концентрации  $\text{SiO}_2$  в шлаке более 80 масс. % активизируется реакция окисления металла с образованием тугоплавких неметаллических включений ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и др.), а также измеренный методом термо-ЭДС растворенный кислород в жидкой ванне увеличивается на 0,00003 масс. % (окисление только через шлак).

Проведены термодинамические расчёты (рисунок 6) для низкоуглеродистых сталей с различным содержанием марганца и кремния: сталь Ст2пс ( $[\text{Mn}]=0,25$  масс. % и  $[\text{Si}]=0,14$  масс. %) и сталь 09Г2С ( $[\text{Mn}]=1,34$  масс. % и  $[\text{Si}]=0,53$  масс. %). В расчёте получен химический состав шлака в промежуточном ковше с учётом материального баланса шлака для граничных условий (мало  $\text{SiO}_2$  – 10-40 масс. % и много  $\text{SiO}_2$  – 65-80 масс. %) и условий работы ЛПК.

В условиях ЛПК проводился дополнительный контроль содержания растворённого кислорода в сталеразливочном и в промежуточном ковшах для оценки его прироста или полная оценка вторичного окисления металла в промежуточном ковше. Было разлито 6 серий плавов на тонкослябовой УНРС. В процессе измерения активности кислорода было установлено, что в промежуточном ковше в среднем происходит увеличение растворённого кислорода на 0,00006 масс. % и был зафиксирован максимальный рост на 0,00012 масс. %. В работе установлена степень влияния процесса окисления через шлак, которая может составлять от 5 до 50 % (в среднем – 25 %).

Для получения низкого содержания общего кислорода (менее 0,0018 масс. % или поступление кислорода не более 0,010-0,100 кг/т) исключения поступления кислорода из воздуха будет недостаточно, необходимо также обеспечить снижение концентрации  $\text{SiO}_2$  в шлаке в промежуточном ковше до уровня ниже 40 масс. % (целевое значение – 25-35 масс. %). Следует отметить, что при концентрациях  $\text{SiO}_2$  в шлаке более 60 масс. % интенсифицируется процесс окисления металла, который приводит к изменению физико-химических свойств шлаковой смеси в кристаллизаторе, с образованием грубых поверхностных дефектов в виде поперечных трещин, вплоть до образования прорыва на УНРС.

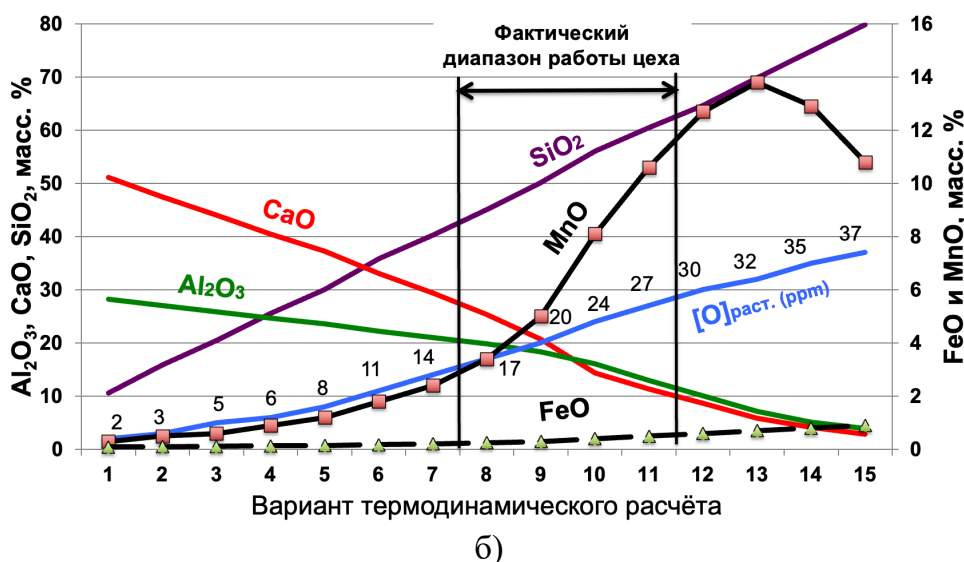
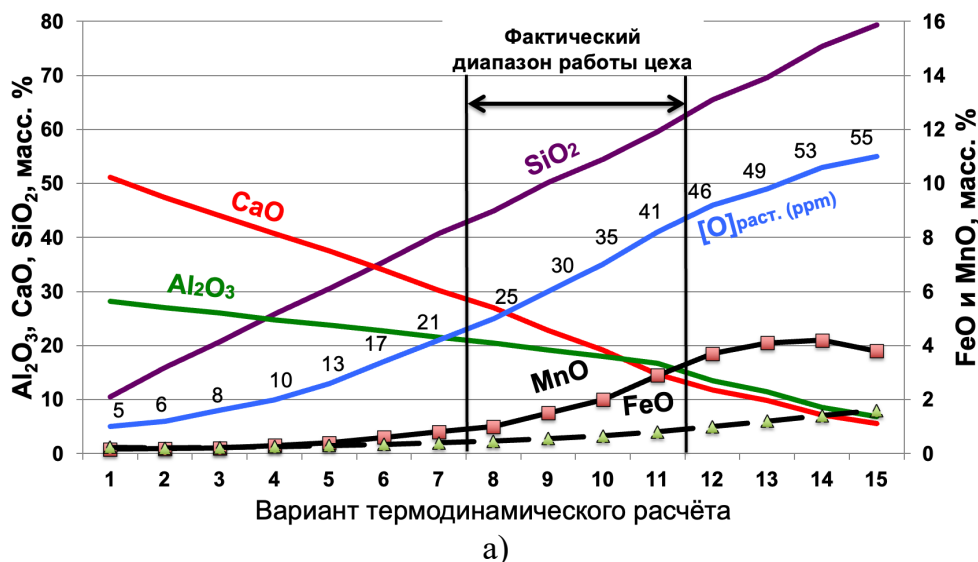


Рисунок 6 – Термодинамический расчёт в программе STM изменения состава шлака в промежуточном ковше и содержания растворённого кислорода в металле в зависимости от количества оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в шлаке для трубных низкоуглеродистых сталей Ст2пс (а) и 09Г2С (б)

*Выводы по STM расчёту № 5.* Расчёты показали, что процессы вторичного окисления через шлак могут составлять от общей доли от 5 до 50 % (в среднем – 25 %). Для получения низкого содержания общего кислорода исключения поступления кислорода из воздуха будет недостаточно, необходимо также обеспечить снижение концентрации  $\text{SiO}_2$  в шлаке в промежуточном ковше до уровня ниже 40 масс. %.

#### Расчёт № 6. Оценка вторичного окисления металла в промежуточном ковше через футеровку

В условиях ЛПК во время проведения эксперимента применялась торкрет-масса типа «А» (таблица 5), которая состоит из периклазовой массы на плотно-спечённом клинкере без оливинов –  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ . Для оценки

влияния рабочей футеровки на процессы окисления металла и образование дефектов металлопроката из-за неметаллических включений произведены серии опытных плавов при разливке с применением торкрет-массы типа «Б», с пониженным содержанием оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Опытными плавками было установлено, что даже самая стойкая футеровка промежуточного ковша не снижает в металле содержание оксидных неметаллических включений и дефекты в трубной продукции, связанные с неметаллическими включениями. Доля влияния футеровки на вторичное окисление стали значительно меньше по сравнению со вторичным окислением кислородом из воздуха и шлака. Рассчитанная доля влияния на общий процесс окисления металла менее 10 %, в среднем следует принимать около 5 %. Поэтому, в дальнейшем процесс окисления расплава на УНРС через огнеупоры промежуточного ковша можно не учитывать. С другой стороны, если стоит задача снизить загрязнение металла экзогенными включениями на основе  $\text{MgO}$  и производить «суперчистую сталь», то рекомендуется применять в технологии торкрет-массу типа «Б» (таблица 5).

Таблица 5 – Химический состав материала рабочей футеровки промежуточного ковша и измеренная скорость износа футеровки в шлаковом поясе

Тип торкрет-массы для рабочего слоя промежуточного ковша	Химический состав торкрет-массы, масс. %					Скорость износа футеровки в шлаковом поясе на шлаке с содержанием $\text{SiO}_2 > 40$ масс. %, мм/ч
	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Тип «А» – природный, спеченный агломерат	≥ 85	≤ 5,5	≤ 3,0	≤ 3,0	-	5,4
Тип «Б» – низко-железистая магнезия	≈ 90,1	≈ 5,0	≈ 0,7	≈ 3,3	≈ 0,3	3,2

*Выводы по STM расчёту № 6.* Определена и установлена доля влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша на процесс общего вторичного окисления металла. Для производства чистых сталей следует учитывать долю влияния окисления стали через футеровку промежуточного ковша, которая может составлять до 10 % от общего окисления.

В результате выполненных STM расчётов №1, 4, 5 и 6 дополнительно были разработаны параметры оперативной оценки вторичного окисления при разливке чистых сталей на УНРС. Предложено в режиме реального времени контролировать следующие параметры процесса вторичного окисления и их граничные значения.

1. Прирост азота в металле. Цель < 0,0005 масс. %.
2. Контроль изменения содержания химических элементов в стали (Al, Si, Mn). Цель – снижение Al < 0,0060 масс. %, прирост Si < 0,0050 масс. % и для сталей легированных марганцем, снижение Mn < 0,010 масс. %.
3. Контроль связанного алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Цель < 0,0020 масс. %.
4. Контроль стабильности разливки металла на УНРС за счёт внедрения в работу компьютерных автоматических программ слежения за позиционированием стопора.
5. Онлайн мониторинг косвенного изменения физико-химических свойств ШОС в кристаллизаторе и факты образования поверхностных дефектов на непрерывнолите металле.

Оперативная оценка окисления на разливке УНРС позволяет осуществлять поиск проблем в технологии производства чистых сталей с целью оперативного и эффективного воздействия на технологию.

#### **Методы углубленного анализа для разработки технологии производства чистых сталей**

На примерах производства тонкого сляба и сортовых, блюмовых заготовок выполнен поиск и подтверждение значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов из-за неметаллических включений с применением методов углубленной аналитики и машинного обучения. С целью получения прикладного применения, представленного подхода, необходима предварительная подготовка массива данных, а также осуществление интерпретации результатов машинного обучения (углубленного анализа), основывающийся на фундаментальных законах и физико-химических процессах, протекающих в сталеплавильном производстве.

**В четвертой главе «Исследование механизма влияния содержания в металле вредных примесей, включений и газов на свойства ШОС в кристаллизаторе»** описан механизм изменения свойств шлака в кристаллизаторе и рассмотрены проблемы разливки чистых сталей на УНРС. В начале главы 4 был представлен литературный обзор по свойствам шлакообразующих смесей для кристаллизатора УНРС и рассмотрены текущие проблемы применения ШОС для кристаллизатора в промышленной практике. К важным физико-химическим характеристикам ШОС для разливки на УНРС относят следующее: скорость плавления ШОС (мг/с), конечная и начальная температура плавления (°С), вязкость (Па·с), температура кристаллизации шлака (°С) и основность (CaO/SiO<sub>2</sub>). В общем представлении ШОС для кристаллизаторов современных УНРС является смесью оксидов системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> с добавками углерода, различных флюсов (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Li<sub>2</sub>O, CaF<sub>2</sub> и др.).

Свойства ШОС для кристаллизатора не всегда прогнозируемые, как запроектировано в технологии из-за непрерывно меняющихся условий во время разливки. К ним относят различные условия, возникающие на уровне мениска и в зазоре слиток-кристаллизатор, из-за особенностей конструкций кристаллизаторов УНРС, различной практики подготовки металла к разливке на внепечной обработке стали и различного содержания  $Al_2O_3$  в жидкой стали (текущие процессы вторичного окисления металла на производстве), а также неравномерности подачи ШОС в кристаллизатор.

Содержание в стали оксидов и водорода нарушают стабильную разливку из-за возникновения дефектов и аварийных ситуаций на УНРС. С другой стороны, низкая концентрация оксидов и водорода, то есть разливка чистых сталей, может привести к формированию продольных трещин на среднеуглеродистых и перитектических сталях и в меньшей степени на низкоуглеродистой стали. Это явление проявлялось при содержании в металле водорода менее 0,0002-0,0005 масс. % и общего кислорода менее 0,0020 масс. %. В данном случае ШОС в кристаллизаторе не менялась, а применяется одна и та же смесь с вязкостью около 0,12 Па·с и основностью  $CaO/SiO_2 \sim 1,04$ .

Опытным путём было установлено, что эффект снижения теплопередачи в кристаллизаторе начинает проявляться при содержании водорода в расплаве металла более 0,0005 масс. %. При низком содержании в металле водорода (менее 0,0002-0,0005 масс. %), теплопередача от корочки металла через шлаковую прослойку увеличивается на 6-14 %, то есть возрастает тепловой поток (теплоперенос). С целью исключения повышения теплового потока в кристаллизаторе, для разливки стали с низким содержанием водорода, необходимо использовать шлакообразующие смеси с более высокой вязкостью.

В случае повышенного содержания  $Al_2O_3$  в стали (более 0,0020-0,0030 масс. %), а также при взаимодействии алюминия в металле с оксидом кремния, возможно насыщение шлака оксидом алюминия ( $Al_2O_3$ ), что приводит к формированию большого количества гарнисажа (грубой корки шлака) в кристаллизаторе с изменением его физико-химических свойств. В таком случае повышенная вязкость шлака кристаллизатора приводит к заметному снижению теплопередачи от слитка к стенкам кристаллизатора.

Необходимо рассматривать отдельное влияние водорода и оксидов в металле, а также их совместное влияние на изменение параметров теплопередачи через шлак в кристаллизаторе. В целях исключения влияния водорода на производство чистых сталей, а, именно, «суперчистой стали», рекомендуется осуществлять вакуумирование металла.

Установлено, что тепловой поток может зависеть как от физико-химических свойств ШОС, так и от конструкции и состояния кристаллизатора. Данное влияние следует разграничивать с целью исключения ошибочных решений по корректировке и совершенствованию технологии разливки чистых сталей на УНРС и оптимальному подбору ШОС. Опытным путём было установлено, что влияние физико-химических свойств ШОС и кристаллизатора на теплопередачу может составлять от 6 до 14 %, а кристаллизатора до 4 %. То есть на практике следует разделять их влияние на теплопередачу. Так как еще не разработаны и не внедрены в производство кристаллизаторы, которые могут регулировать и контролировать тепловой поток, то следует продолжать рассматривать ШОС для выполнения двух функций, как регулирование тепловым потоком, так и обеспечение необходимой смазкой.

Разливка чистых сталей с применением ШОС низкой основностью ( $\text{CaO/SiO}_2 < 1,10$ ), которая применялась для условно «грязной стали», может приводить к образованию продольных трещин. Промышленные эксперименты разливки на тонкослябовой УНРС показали, что при содержании в расплаве общего кислорода  $\leq 0,0020$  масс. % и водорода  $\leq 0,00050$  масс. % количество продольных трещин на слябе увеличивается (таблица 6).

Таблица 6 – Влияние содержания водорода в жидкой стали на образование продольных трещин для среднеуглеродистого металла

Содержание водорода в промежуточном ковше УНРС, масс. %	Процент слябов с трещинами, %
< 0,00010	4,4
0,00010 – 0,00020	3,2
0,00020 – 0,00030	1,7
0,00030 – 0,00040	0,9
0,00040 – 0,00050	0,5
> 0,00050	0

Впервые были получены зависимости образования продольных трещин на тонком слябе от содержания водорода и косвенно от азота. Анализ данных был выполнен по 11,1 тыс. слябов. Коэффициент парной корреляции составил 0,42 на металле без вакуумной обработки и 0,98 на металле с вакуумной обработкой. Чем ниже содержание в металле водорода и общего кислорода, тем выше вероятность возникновения продольных трещин на слябе. Уровень образования продольных трещин был всегда выше на вакуумированных среднеуглеродистых сталях.

С целью оптимального выбора шлакообразующей смеси (ШОС) для разливки чистых сталей на любых УНРС необходимо выполнить следующее. Во-первых, стабилизировать процесс на выплавке и внепечной обработке



стали по получению металла с низким содержанием оксидов, в некоторых случаях и газонасыщенности, в сталеразливочном ковше. Во-вторых, решить задачи, связанные со вторичным окислением между сталеразливочным и промежуточным ковшами и в самом промежуточном ковше. Улучшить технологию шлакообразования в промежуточном ковше путём снижения окисления металла через наведенный шлак (минимизация содержания в шлаке  $\text{SiO}_2$ ), а также исключить попадание ковшевого шлака и шибера засыпки в промежуточный ковш в периоды смен сталеразливочных ковшей, а также не допускать прожигание шибера кислородом (источник  $\text{FeO}$ ). Кроме этого, следует учитывать и снижать в составах огнеупоров промежуточного ковша, то есть рабочего слоя кислых оксидов ( $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), соприкасающегося с жидкой сталью, для того чтобы окисление стали через футеровку на разливке было минимальным. Далее следует осуществлять выбор оптимального ШОС из существующих или при необходимости выполнять соответствующую корректировку физико-химических свойств ШОС по выбору оптимального плавления смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор. Регулируемые параметры шлака в кристаллизаторе – это основность ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) и вязкость ШОС (Па·с). Новая улучшенная ШОС для кристаллизатора в металлургической практике должна обеспечивать оптимальную смазку и теплоперенос от корочки металла к кристаллизатору, с целью достижения минимизации поверхностных дефектов на непрерывно-литом металле и исключения внеплановых прерываний серий плавов на УНРС из-за прорывов кристаллизующейся корочки металла.

**В пятой главе «Разработка классификации чистоты стали»** рассматривается вопрос влияния содержания в металле общего кислорода, азота, водорода, серы, фосфора на качество металлопродукции и её эксплуатационные свойства.

В сталеплавильных цехах для производства чистых сталей необходимо учитывать текущие технологические возможности оборудования, выстроенную логистику и «узкие места», которые могут критично сказываться на качестве выпускаемой стали по содержанию неметаллических включений и газов. Такие показатели как снижение в расплаве вредных примесей, включений, газов и как действующая логистика передачи ковшей и их одновременное использование для сталей различного качества должны быть учтены для будущей концепции совершенствования и развития сталеплавильного передела. В ином случае производить «чистую» и конкурентоспособную сталь не представляется возможным.

Объёмное содержание включений в пробах из сталеразливочного ковша на всем марочном исследуемом сортаменте находилось в диапазоне 0,0043 до 0,0230 об. % (среднее значение – 0,0092 об. %), содержание вклю-

чений в пробах из промежуточного ковша находилось в диапазоне от 0,0063 до 0,0210 об. % (среднее значение – 0,0129 об. %). Метод определения объемной доли включений проводили согласно ASTM E 1245 «Стандартное практическое руководство по определению содержания включений или компонентов вторичной фазы в металлах при помощи автоматического анализа изображений».

Установлено, что объемная доля включений в промежуточном ковше в среднем повышается на 40 %. Увеличение включений в промежуточном ковше УНРС было рассмотрено в главе 3 при оценке процесса вторичного окисления во время разливки. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) включений показал (рисунок 7-а), что в пробах из сталеразливочного ковша большинство включений являются сложными оксидами (алюминаты кальция и магния) с сульфидами кальция и без. В пробах из промежуточного ковша (рисунок 7-б) большинство включений содержат те же алюминаты, но более крупных размеров и продукты реакций вторичного окисления, в состав которых входит марганец и кремний.

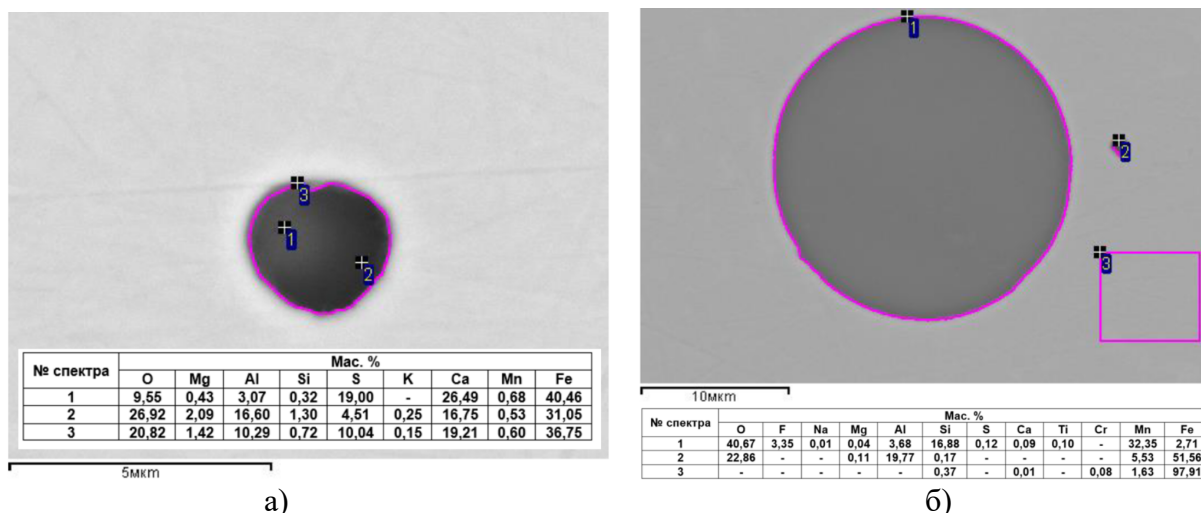


Рисунок 7 – Результат микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в пробе из сталеразливочного (а) и промежуточного ковшей (б) при производстве тонкого сляба

В сталеразливочном ковше обнаружены преимущественно многофазные сложные алюминаты кальция, также присутствуют сульфиды кальция (CaS) и незначительное количество алюминатов магния. Размер этих включений малый и основная их доля с размером менее 10 мкм преобладает над размером от 10 до 50 мкм. Неметаллические включения в пробе, отобранной из промежуточного ковша, в основном представляют собой укрупненные сложные оксиды алюминатов кальция и магния размером до 50 мкм. При этом обнаружено увеличение доли включений с магнием в промежуточ-

ном ковше УНРС и в целом количество включений размером более 50 мкм выше, чем в сталеразливочном ковше (таблица 7). Было исследовано 37 плавок и 74 пробы металла. Также обнаружены включения продуктов реакций вторичного окисления металла шлаком, в которых присутствуют в значительном количестве Si и Mn (крупные включения размером от 50 до 100 мкм и более 100 мкм). В некоторых пробах металла из промежуточного ковша были также обнаружены сульфиды кальция на поверхностях включений алюминатов (сульфидная оболочка). Все эти данные подтверждают не решенную задачу со вторичным окислением металла в промежуточном ковше.

Таблица 7 – Размеры неметаллических включений в сталеразливочном и промежуточном ковшах

Место отбора проб	Распределение неметаллических включений по размерам, %			
	от 2 до 10 мкм	от 10 до 50 мкм	от 50 до 100 мкм	более 100 мкм
Сталеразливочный ковш	58,0	31,2	8,0	2,8
Промежуточный ковш	64,0	20,0	11,4	4,6

Данные из таблицы 7 говорят о том, что преобладают включения не макроскопических размеров (более 100 мкм), а преимущественно включения малых размеров (менее 10 мкм), а на втором месте по количеству размеров от 10 до 50 мкм. Данную оценку чистоты стали рекомендуется выполнять как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах, с целью установления уровня действующей технологии, а также определения эффективности реализации специальных мероприятий по снижению в металле неметаллических включений.

Анализ включений методом МРСА при производстве сортовой и блюмовой непрерывнолитой заготовок (диаметр 150 и 460 мм соответственно) выявил аналогичную тенденцию ухудшения чистоты стали в промежуточном ковше, как и на производстве тонкого сляба – в большинстве случаев увеличивался размер включений от 10-40 мкм до размеров более 40 мкм, а также количество включений в исследуемых образцах из промежуточного ковша сортовых и блюмовых УНРС становилось больше. Основные включения, обнаруженные на производстве сортовых и блюмовых заготовок: оксид алюминия, алюминаты кальция и магния, оксид титана, частицы огнеупоров, сульфид кальция, оксид кремния и марганца.

«Чистая сталь» по Гуляеву А.П. содержит вредных примесей и газов не более 1500 атомов на 1 млн. атомов железа, без учёта содержания в металле цветных примесей. В «чистой стали» следует ограничивать следующее

содержание примесей и газов (масс. %):  $[O]_{\text{общий}} \leq 0,00500 \%$ ;  $[S] \leq 0,02500 \%$ ;  $[H] \leq 0,00060 \%$ ;  $[N] \leq 0,01000 \%$ ;  $[P] \leq 0,02500 \%$ .

«Суперчистая сталь» (патент РФ № 2740949) содержит вредных примесей и газов не более 500 атомов на 1 млн. атомов железа, без учёта содержания в металле цветных примесей. В «суперчистой стали» следует ограничивать следующее содержание примесей и газов (масс. %):  $[O]_{\text{общий}} \leq 0,00150 \%$ ;  $[S] \leq 0,00150 \%$ ;  $[H] \leq 0,00015 \%$ ;  $[N] \leq 0,00500 \%$ ;  $[P] \leq 0,00800 \%$ . «Суперчистая сталь» в 3 раза чище в отличие от термина «чистая сталь» по Гуляеву А.П.

Данная классификация позволяет дифференцировано подходить как к требованиям технологии, так и к требованиям необходимого набора оборудования сталеплавильного производства, и в том числе впервые к техническим требованиям применяемых материалов в производстве стали (металлошихта, ферросплавы и раскислители, шлакообразующие, флюсы, углеродосодержащие материалы, огнеупоры и др.).

**В шестой главе «Разработка алгоритма корректировки технологии производства чистых сталей»** рассмотрены производственные потери из-за неметаллических включений и в том числе все выявленные негативные элементы производства чистых сталей в предыдущих главах, которые на прямую отражаются на производительности сталеплавильного цеха и в конечном итоге ухудшают технико-экономические показатели производства или приводят к неверным решениям развития и совершенствования технологии сталеплавильного производства.

В результате проведенных работ по совершенствованию технологии производства чистых сталей и разработке способа получения «суперчистой стали» был создан новый метод мониторинга и контроля этих технологий в сталеплавильном производстве. Были определены ключевые технологические параметры, которые следует непрерывно мониторить в режиме реального времени. В случае каких-либо отклонений осуществлять соответствующее воздействие и корректировку на технологию.

Чистота стали контролируется на всей технологической цепочке «выплавка-выпуск-внепечная обработка-разливка». В результате проведенного диссертационного исследования и решения задачи по мониторингу и контролю производства чистых сталей был создан перечень из 26 ключевых контролируемых параметров, которые влияют на качество, производительность и себестоимость стали. Перечень приведен в приложении к диссертации. Эти ключевые параметры охватывают следующие технологические этапы производства чистых сталей от выплавки до разливки: раскисление полупродукта на выпуске плавки; шлакообразование на выпуске плавки и во время внепечной обработки стали в сталеразливочном ковше; отсечка

сталеплавильного окисленного шлака на выпуске плавки; продувка расплава инертным газом в сталеразливочном ковше; вакуумирование стали; модифицирование неметаллических включений кальцием; оценка защиты металла от вторичного окисления на УНРС; косвенный контроль разливаемости стали на УНРС; организация процесса по технологии «плавка на плавку»; организация работы со сталеразливочными ковшами; чистота применяемых материалов по вредным примесям и соединениям.

Алгоритм корректировки технологии производства «суперчистой стали» состоит из двух следующих блоков, который охватывает всю технологическую цепочку от выплавки до разливки стали.

Блок 1. Первый этап корректировки заключается в стабилизации технологического процесса выплавки и внепечной обработки стали, связанный с получением низкого содержания оксидов и сульфидов в сталеразливочном ковше ( $[O]_{\text{общий}} < 10-15 \text{ ppm}$ ,  $[S] < 15 \text{ ppm}$  и  $[Mg] < 8 \text{ ppm}$ ), вредных примесей и газов в сталеразливочном ковше, а также ключевое – вся «суперчистая сталь» должна проходить вакуумную обработку ( $[H] < 1,5 \text{ ppm}$ ). Второй этап – решение задачи по сохранению чистоты «суперчистой стали» в промежуточном ковше ( $[O]_{\text{общий}} < 10-15 \text{ ppm}$  и  $[H] < 1,5-2,0 \text{ ppm}$ ).

Блок 2. После получения стабильной чистоты стали в промежуточном ковше выполняется корректировка и подбор физико-химических свойств ШОС для кристаллизатора УНРС по вязкости и основности. Ключевой момент корректировки технологии производства «суперчистой стали» – это реализация трёх мероприятий одновременно: вакуумирование металла; применение специальных ШОС для промежуточного ковша, которые не будут окислять металл и чрезмерно изнашивать футеровку промежуточного ковша; выполнение технологии автоматической отсечки ковшевого шлака.

После стабилизации технологии производства стали на всей технологической цепочке имеет место быть улучшение технологии модифицирования за счёт поиска оптимума по расходу кальция. То есть необходимо опытным путём определить уровень поступления кислорода в расплав на разливке (в кг/т), тем самым можно определить правильную отдачу кальция для любых производственных условий.

Для поиска баланса по корректировке и оценке текущей ситуации следует внедрить мониторинг и контроль ключевых технологических параметров, а также следует применять все доступные цифровые технологии для работы цеха в целевом оптимуме: методы автоматизированного управления производством, включая элементы математических и термодинамических моделей, прогнозные и статические модели, построенные с применением физико-химических основ, технологии машинного обучения, больших данных, нейронных сетей и пр.

Принятие решения по корректировке и изменению технологии должно осуществляться одним лицом или единым ответственным центром, то есть вносить какие-либо изменения без его участия никто не может. Таким образом, имеется возможность гораздо быстрее выявлять несовершенства технологии, которые можно эффективно и адекватно скорректировать и улучшить. Следует выполнять аудит технологии на постоянной основе в виде подготовки ежедневных и еженедельных отчётов, в которых необходимо осуществлять поиск первопричин, как ухудшения, так и улучшения производства чистых сталей. Также в этих отчётах могут быть определены значимые и эффективные мероприятия для последующей их реализации на производстве.

На рисунке 8 представлена схема описанного выше алгоритма корректировки технологии производства «суперчистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству.

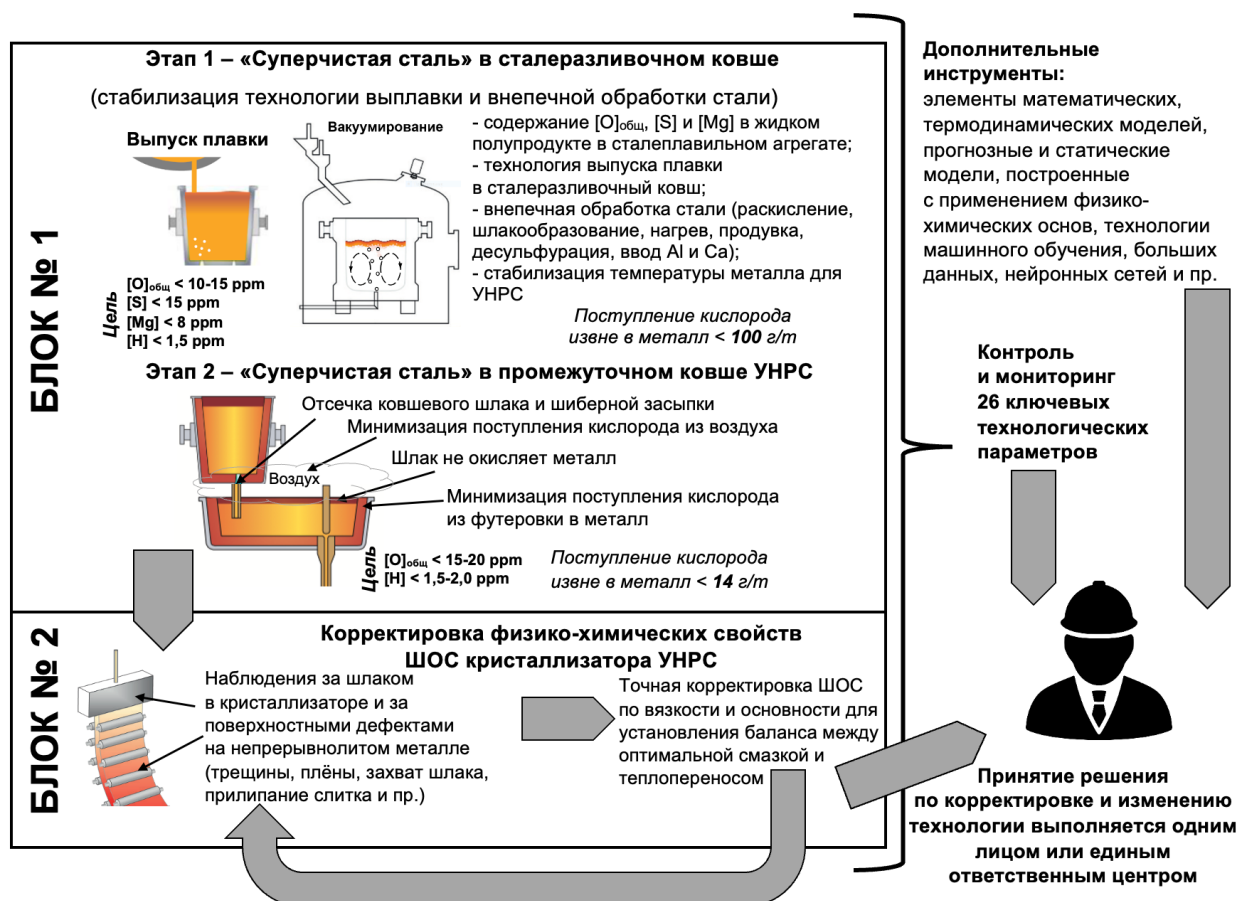


Рисунок 8 – Схема алгоритма корректировки технологии производства «суперчистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству

Предлагаемый алгоритм охватывает все процессы производства чистых сталей, логистику организации и подходы к созданию новых методов, способов и средств совершенствования сталеплавильного процесса, носит

общий характер и может служить инструментом для оперативного поиска высокоэффективных технологических решений практических задач для технологии выплавки, внепечной обработки и разливки стали. В этом случае содержание и наполнение представленной схемы алгоритма на рисунке 8, которая обеспечивает наглядность и быстрый доступ к взаимосвязям всех составляющих её элементов, конкретизируются с учётом специфики рассматриваемого производства или завода. На практике применение данного алгоритма корректировки технологии изменяет весь технологический процесс и получаемые результаты, с применением информации от дополнительных инструментов, можно считать прообразом новой технологии.

**В приложениях** приведены исходные данные шести вычислительных экспериментов в программе SyTherMa (STM), энергетические параметры системы Fe–Mg–Ca–Al–Mn–C–O для ПРКМ, результаты количественной оценки фазового состава тугоплавких отложений от разливочных стаканов УНРС, письма и акты об использовании результатов работы, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, патент, перечень контролируемых параметров технологии производства чистых сталей и составляющие экономического эффекта по результатам реализации проекта «Чистая сталь».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ**

Диссертационное исследование, связанное с разработкой комплексной технологии получения стали с повышенными требованиями по содержанию неметаллических включений, примесей и газов в условиях современных сталеплавильных цехов с учётом всей технологической цепочки, включающее разработку новых подходов и методов промышленного производства, позволило существенно снизить расходы материальных и энергетических ресурсов и решить важную народно-хозяйственную проблему повышения эффективности деятельности металлургических предприятий, производящих высококачественную сталь для машиностроения, энергетики, транспорта и др.

Внедрение результатов обеспечивает значительный вклад в развитие экономики России за счёт снижения дефектов из-за неметаллических включений и повышения выхода годного металла. Разработка новых «чистых» сталей позволит производить металлопродукцию с повышенными эксплуатационными и потребительскими свойствами.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Выполнен анализ современного состояния технологии производства высококачественных сталей с низким содержанием неметаллических вклю-

чений, примесей и газов. Рассмотрены современные представления о чистоте стали и приведен обзор ранее опубликованных результатов получения и производства данной стали. Рассмотрены требования, предъявляемые к сталям различного назначения по чистоте металла по примесям и неметаллическим включениям; методы снижения содержания этих включений в стали и в сталеплавильном производстве; применяемые технологии на предприятиях для улучшения эксплуатационных свойств металла за счёт обеспечения производства чистых сталей; существующие проблемы производства чистых сталей в современных сталеплавильных цехах.

2. Развита уникальная комплекс интеллектуальных и аппаратных средств (программа SyTherMa или STM), позволяющий разрабатывать инновационные технологии получения чистых и сверхчистых сталей и обеспечивать их стабильное, эффективное функционирование в условиях современного сталеплавильного производства. В качестве основной научной идеи развитого комплекса, эффективно работает положение о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ» и контроле внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Эта идея обеспечивает быстрое определение критических точек в разрабатываемых и действующих технологиях, помогает в определении эффективных способов решения возникающих проблем качества чистых и сверхчистых сталей.

3. Выполненный анализ комплекса мероприятий производства высококачественных сталей от выплавки до разливки позволил применить новый подход разработки технологии «суперчистой стали» с применением всех доступных современных технологий и инструментов. Основные направления, которые были охвачены сразу: выпуск плавки, раскисление, шлакообразование, десульфурация, легирование, продувка расплава инертным газом, модифицирование включений, защита от вторичного окисления металла, применяемые материалы и огнеупоры на выплавке и разливке стали.

4. Разработаны и внедрены эффективные мероприятия, снижающие случаи попадания тугоплавких неметаллических включений с внутренней поверхности разливочного стакана промежуточного ковша в слиток. Установлено и научно обосновано предельное содержание вредных элементов в стали, раскисленной алюминием: общего кислорода – не более 0,0020 масс. %, серы – не более 0,0030 масс. % и магния – не более 0,0008 масс. %, превышение которых приводит к значительному снижению качества готовой металлопродукции за счёт формирования избыточного количества неметаллических включений.

5. Определена фактическая доля влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша на процесс общего вторич-



ного окисления расплава при производстве высококачественной стали, раскисленной алюминием, которая может составлять до 10 % от общего окисления. Доля влияния была определена путём комплексного подхода учёта поступления кислорода извне от всех возможных источников, что обеспечивает будущее развитие технологий производства сталей до сверхнизкого содержания включений за счёт управления вторичным окислением стали.

6. Разработан и внедрен комплекс технологических мероприятий производства чистых сталей на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла на основе изучения механизма образования продольных и поперечных дефектов на непрерывнолитом металле при определенных физико-химических свойствах, структуре шлака в кристаллизаторе и теплопереноса от корочки слитка к кристаллизатору, а также предложен алгоритм корректировки технологии для промышленного применения.

7. С целью оптимального выбора ШОС кристаллизатора для разливки чистых сталей на любых УНРС необходимо стабилизировать процесс на выплавке и внепечной обработке по получению металла с низким содержанием оксидов и газов в сталеразливочном ковше, а также решить задачи, связанные со вторичным окислением стали между сталеразливочным и промежуточными ковшами и в самом промежуточном ковше. Далее следует осуществлять подбор оптимального ШОС по плавлению смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор с целью достижения минимизации поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле.

8. Опытным путём было установлено, что влияние ШОС на теплопередачу от металла к кристаллизатору может составлять от 6 до 14 %, а конструкция кристаллизатора до 4 %. Так как еще не разработаны и не внедрены в производство кристаллизаторы, которые могут регулировать и контролировать тепловой поток, то следует продолжать рассматривать ШОС для выполнения следующих двух функций: регулирование тепловым потоком и обеспечение смазкой.

9. Разработана новая интерпретация классификации чистоты раскисленной алюминием стали и введен новый термин «суперчистая сталь» для промышленного применения, содержащая сумму менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа (масс. %):  $[O]_{\text{общий}} \leq 0,00150 \%$ ,  $[S] \leq 0,00150 \%$ ,  $[H] \leq 0,00015 \%$ ,  $[N] \leq 0,00500 \%$ ,  $[P] \leq 0,00800 \%$ . Данная классификация позволяет дифференцировано подходить одновременно как к требованиям технологии, так и к требованиям необходимого набора оборудования сталеплавильного производства, и в том числе впервые к техническим требованиям материалов, применяемых на производстве стали.

10. Предложен новый метод мониторинга и контроля технологии производства чистых сталей, заключающийся в создании уникального комплекса интеллектуальных и аппаратных средств, позволяющий быстро разрабатывать инновационные технологии получения чистых сталей и обеспечивать их стабильное функционирование. Разработан и применён новый алгоритм корректировки технологических режимов производства высококачественной стали, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле параметров отдельных элементов всей технологической цепочки, учитывающий взаимосвязанность работы отдельных агрегатов.

11. Разработан алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей на всей технологической цепочке «выплавка-выпуск-внепечная обработка-разливка», который позволяет сократить негативное воздействие на окружающую среду, так как получаемые результаты имеют прямое влияние на ресурсо- и энергоэффективность, а также экономику работы металлургического предприятия, производящего высококачественную сталь. Алгоритм корректировки технологии производства высококачественной стали совместно с предлагаемым способом получения «суперчистой стали» позволяют гарантировано получать высококачественную сталь в зависимости от набора оборудования и качества применяемых материалов, а также обеспечить стабильный и достаточно высокий выход годной продукции, вследствие исключения невоспроизводимых результатов по качеству стали, то есть поверхностных и внутренних сталеплавильных дефектов в металлопрокате из-за неметаллических включений.

12. Предложен подход к организации промышленного производства, охватывающий все переделы получения высококачественной стали, который обеспечивает внедрение единой системы автоматизированного управления производством и позволяет решать задачи оптимального управления по таким показателям как себестоимость, темп производства и качество получаемой стали.

13. Разработана комплексная технология получения стали высокой чистоты для современных сталеплавильных цехов. Определены ключевые технологические параметры производства чистых сталей, от выплавки до разливки металла и с внедрением мониторинга и контроля 26 ключевых технологических параметров, которые позволяют поднять общий уровень технологии до показателей лучших мировых практик за счёт оптимального пути совершенствования технологии.

14. Внедрение разработанной технологии производства чистых сталей на других отечественных предприятиях может привести к снижению удельных суммарных затрат около 155,1 рублей и более на 1 тонну непрерывнолитого металла.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. **Ботников, С.А.** Влияние геометрии металлопроводки промежуточного ковша и технологических параметров разливки на работу сортовых УНРС / С.А. Ботников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 38-43.
2. Ряполов, А.Г. Анализ мощностей электросталеплавильного производства в России и прогноз потребления металлолома ЭСПЦ / А.Г. Ряполов, **С.А. Ботников** // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 21-23.
3. Лубе, И.И. Применение непрерывнолитой заготовки круглого сечения для сортопрокатного производства / И.И. Лубе, **С.А. Ботников**, В.П. Турбар // Metallurg. – 2014. – № 11. – С. 52-54.
4. **Ботников, С.А.** Технические решения для производства качественной непрерывнолитой заготовки из трубной, сортовой и колесной стали / С.А. Ботников, А.Г. Ряполов // Сталь. – 2015. – № 6. – С. 12-14.
5. **Ботников, С.А.** Оптимизация технологии производства сталей, раскисленных алюминием, в условиях ЛПК / С.А. Ботников, Д.В. Мороз, Г.В. Семернин // Сталь. – 2016. – № 2. – С. 23-28.
6. Мороз, Д.В. Совершенствование технологии производства рулонного и листового проката в ЛПК ВМЗ / Д.В. Мороз, **С.А. Ботников**, В.А. Ерыгин // Metallurg. – 2018. – № 1. – С. 55-62.
7. Мороз, Д.В. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС. Часть 1. Практические примеры оценки вторичного окисления / Д.В. Мороз, **С.А. Ботников**, В.Н. Лавров // Черные металлы. – 2018. – № 9. – С. 34-39.
8. Мороз, Д.В. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС. Часть 2. Термодинамические расчеты / Д.В. Мороз, **С.А. Ботников**, В.Н. Лавров // Черные металлы. – 2018. – № 11. – С. 53-57.
9. **Ботников, С.А.** Технологические аспекты производства чистой стали в сталеразливочном ковше для трубного сортамента / С.А. Ботников // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 11-12. – С. 2-7.
10. **Ботников, С.А.** Разработка модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах в литейно-прокатном комплексе / С.А. Ботников, О.С. Хлыбов, А.Н. Костычев // Сталь. – 2019. – № 10. – С. 7-12.
11. Лавров, В.Н. Влияние геометрии сталевыпускного отверстия дуговой печи на производственные показатели литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» / В.Н. Лавров, **С.А. Ботников**, А.В. Косоногов, С.А. Сомов // Черные металлы. – 2021. – № 1. – С. 11-16.
12. Подкуров, С.В. Пути снижения водорода в стали за счёт совершенствования технологии выплавки полупродукта в современной ДСП /

С.В. Подкур, Г.И. Котельников, В.В. Аксенова, С.А. Сомов, **С.А. Ботников**, Х. Абдельвахед, А.И. Хассан // Тяжелое машиностроение. – 2021. – № 4. – С. 5-9.

13. Подкур, С.В. Оптимальное соотношение водорода и углерода в стали, обеспечивающее минимальный уровень отсортировки в стали на металлургическом предприятии / С.В. Подкур, Г.И. Котельников, Д.В. Караваев, **С.А. Ботников** // Черные металлы. – 2022. – № 8. – С. 10-16. DOI: 10.17580/chm.2022.08.02.

14. **Ботников, С.А.** Фазовые равновесия при обработке алюминием и кальцием экономнолегированной марганецсодержащей стали в агрегатах, футерованных огнеупорами на основе магнезита / С.А. Ботников, Л.А. Макровец, И.В. Бакин, Г.Г. Михайлов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 220-230. DOI:10.32339/0135-5910-2023-3-220-230 (категория К2).

15. **Ботников, С.А.** Новый подход к разработке эффективной технологии производства стали с низким содержанием неметаллических включений / С.А. Ботников // Черные металлы. – 2023. – № 7. – С. 22-29. DOI:10.17580/chm.2023.07.02 (категория К2).

16. **Ботников, С.А.** Физико-химические расчёты сталеплавильных процессов и прогнозные модели для производства чистых сталей / С.А. Ботников // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 10. – С. 818-826 (категория К2).

#### **Публикации, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus**

17. **Botnikov, S.A.** Effect of the geometry of the metal conduits of a tundish and the casting parameters on the performance of continuous section casters / S.A. Botnikov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55, № 4. – P. 272-276. DOI:10.1007/s11148-014-9706-z.

18. Lube, I.I. Continuous round Billet for bar production / I.I. Lube, **S.A. Botnikov**, V.P. Turbar // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44, № 12. – P. 910-911. DOI:10.3103/S0967091214120109.

19. Lube, I.I. Use of a round continuous-cast billet for the production of rolled sections / I.I. Lube, **S.A. Botnikov**, V.P. Turbar // Metallurgist. – 2015. – Vol. 58, № 3. – P. 973-975. DOI:10.1007/s11015-015-0026-4.

20. **Botnikov, S.A.** Producing high-quality continuous-cast billet from pipe, bar, and wheel steel / S.A. Botnikov, A.G. Ryapolov // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45, № 6. – P. 436-438. DOI:10.3103/S0967091215060078.

21. **Botnikov, S.A.** Optimizing the production of steel with reduction by aluminum, in casting and rolling systems / S.A. Botnikov, D.V. Morov, G.V. Semernin // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, № 2. – P. 138-143. DOI:10.3103/S0967091216020042.

22. Morov, D.V. Improvement in manufacturing technology for coiled and sheet rolled product in a VMZ casting and rolling complex / D.V. Morov, **S.A. Botnikov**, V.A. Erygin // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62, № 5. – P. 49-57. DOI:10.1007/s11015-018-0624-z.

23. **Botnikov, S.A.** Development of a steel temperature prediction model in a steel ladle and tundish in a casting and rolling complex / S.A. Botnikov, O.S. Khlybov, A.N. Kostychev // Steel in Translation. – 2019. – Vol. 49, № 10. – P. 688-694. DOI:10.3103/S096709121910005X.

24. **Botnikov, S.A.** Development of the metal temperature prediction model for steel-pouring and tundish ladles used at the casting and rolling complex / S.A. Botnikov, O.S. Khlybov, A.N. Kostychev // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, №. 11. – P. 792-803. DOI:10.1007/s11015-019-00891-y.

25. Lavrov, V.N. Influence of the geometry arc furnace steel taphole on production parameters of the casting and rolling complex of JSC VMZ / V.N. Lavrov, **S.A. Botnikov**, A.V. Kosonogov, S.A. Somov // Chernye Metally. – 2021. – № 1. – P. 11-16. DOI:10.17580/chm.2021.01.02.

26. **Botnikov, S.A.** A new approach to the development of an efficient technology for production of steel with a low content of non-metallic inclusions / S.A. Botnikov // Chernye Metally. – 2023. – № 7. – P. 22-29. DOI:10.17580/chm.2023.07.02 (категория К2).

### Монография

27. **Ботников, С.А.** Технология и оборудование УНРС. Производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок / С.А. Ботников – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 300 с.

### Патенты и программы для ЭВМ

28. **Ботников, С.А.**, Моров, Д.В. Способ получения суперчистой стали, раскисленной алюминием, для производства высококачественной металлопродукции. // Патент Российской Федерации на изобретение № 2740949 от 21.01.2021 г.

29. Толстолицкий, А.А. SyTherMa-равновесие / А.А. Толстолицкий, Г.И. Котельников, **С.А. Ботников** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669194; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2021 г.

### Публикации в других изданиях

30. **Ботников, С.А.** Перспективная модель управления производством современного металлургического мини-завода в условиях ЭСПЦ ОАО «ПНТЗ» / С.А. Ботников // Современные проблемы электрометаллургии: сб. науч. тр. (часть 2) / под ред. В.Е. Рощина – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 111-116.

31. Питюл, К.З. Анализ состояния мощностей электросталеплавильного производства на металлургических заводах России и прогноз потребления металлолома в дуговых печах / К.З. Питюл, **С.А. Ботников** // Современные проблемы электрометаллургии: сб. науч. тр. (часть 1) / под ред. В.Е. Рощина – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С. 3-8.

32. Ряполов, А.Г. Реконструкция сталеплавильного производства на Чусовском металлургическом заводе / А.Г. Ряполов, **С.А. Ботников** // Уральская промышленно-экономическая неделя 6-го международного промышленного Форума: Каталог 2014 – Челябинск. – С. 95-96.

33. **Ботников, С.А.** Влияние геометрии металлопроводки промежуточного ковша и технологических параметров разливки на работу сортовых МНЛЗ / С.А. Ботников // Новые огнеупоры. – 2014. – № 7. – С. 10-14.

34. **Ботников, С.А.** Реконструкция сталеплавильного производства на Чусовском металлургическом заводе / С.А. Ботников // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции молодых работников Металл 2014 в ОАО «Белорусский металлургический завод». – Жлобин: БМЗ, 2014. – С. 10-11.

35. Ряполов, А.Г. Оптимальный выбор технологии производства непрерывнолитой заготовки из трубной и колесной стали / А.Г. Ряполов, А.А. Печерица, А.А. Московской, **С.А. Ботников**, С.А. Чайковский // Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавильщиков. – Полевской: СТЗ, 2014. – С. 370-374.

36. Лубе, И.И. Применение непрерывнолитой заготовки круглого сечения для сортопрокатного производства / И.И. Лубе, **С.А. Ботников**, В.П. Турбар // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 41-42.

37. **Ботников, С.А.** Технические решения для производства качественной непрерывнолитой заготовки из трубной, сортовой и колесной сталей / С.А. Ботников, А.Г. Ряполов // Бюллетень «Черная металлургия». – 2015. – № 3. – С. 42-46.

38. Моров, Д.В. Совершенствование мониторинга и контроля сквозной технологии производства рулонного и листового проката в ЛПК / Д.В. Моров, **С.А. Ботников** и др. // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 502-511.

39. Мурысев, В.А. Совершенствование шлакового режима в ковше для марок сталей раскисленных алюминием / В.А. Мурысев, С.А. Сомов, **С.А. Ботников** // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 414-418.

40. Лопатенко, А.Д. Исследование процессов рафинирования при производстве трубной стали с целью повышения качества готового изделия / А.Д. Лопатенко, **С.А. Ботников**, А.Е. Семин // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 490-493.

41. Моров, Д.В. Совершенствование мониторинга и контроля сквозной технологии производства рулонного и листового проката в ЛПК / Д.В. Моров, **С.А. Ботников**, В.А. Ерыгин // Сталь. – 2017. – № 7. – С. 15-20.

42. **Ботников, С.А.** Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС / С.А. Ботников // Сборник трудов международной научной конференции Физико-химические основы металлургических процессов посвященная 115-летию со дня рождения академика А.М. Самарина. Москва, 2017. – С. 47.

43. Моров, Д.В. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС / Д.В. Моров, **С.А. Ботников**,

В.Н. Лавров // Сборник трудов XV международного конгресса сталепла-  
вильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 390-394.

44. Моров, Д.В. Влияния геометрии сталевыпускного отверстия (эрке-  
ра) дуговой сталеплавильной печи на производственные показатели Литей-  
но-прокатного комплекса АО «ВМЗ» / Д.В. Моров, **С.А. Ботников**,  
В.Н. Лавров // Сборник трудов XV международного конгресса сталепла-  
вильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 243-249.

45. Лопатенко, А.Д. Исследование процессов рафинирования при про-  
изводстве трубной стали с целью повышения качества готового изделия /  
А.Д. Лопатенко, **С.А. Ботников**, А.Е. Семин // Сборник трудов XV между-  
народного конгресса сталепла-  
вильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 283-287.

46. **Ботников, С.А.** Разработка модели прогнозирования температуры  
металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах в литейно-прокатном  
комплексе / С.А. Ботников, О.С. Хлыбов, А.Н. Костычев // *Металлург.* –  
2019. – № 8. – С. 27-35.

47. **Ботников, С.А.** Разработка технологии чистой стали и её внедре-  
ние в условиях современных сталеплавильных цехов с комплексным учётом  
повышенных требований к качеству и производству / С.А. Ботников,  
Д.В. Моров // *Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Междуна-  
родной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация  
сталепла-  
вильщиков», 2020. – С. 100-111.*

48. **Ботников, С.А.** Базовые элементы технологии производства «чи-  
стой стали» в современном электрометаллургическом комплексе /  
С.А. Ботников // *Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Меж-  
дународной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассо-  
циация сталепла-  
вильщиков», 2020. – С. 174-179.*

49. **Ботников, С.А.** Разработка и внедрение алгоритма корректировки  
технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повы-  
шенных требований к качеству металлопродукции и производительности це-  
ха / **С.А. Ботников** // Сборник трудов XVI международного конгресса ста-  
леплавильщиков и производителей металлов. – Екатеринбург: ПАО «ТМК»,  
2021. – С. 44-51.

50. **Ботников, С.А.** Новый подход к разработке эффективной техноло-  
гии производства стали на базе научных основ получения стали с низким со-  
держание неметаллических включений / С.А. Ботников // Сборник трудов  
XVII международного конгресса сталепла-  
вильщиков и производителей ме-  
талла. – Магнитогорск: ПАО «ММК», 2023. – С. 46-58.

51. Мальгинов, А.Н. Определение возможности разработки моделей  
прогнозирования загрязнённости металла непрерывнолитой заготовки неме-  
таллическими включениями на базе методов машинного обучения /  
А.Н. Мальгинов, Л.В. Ронков, А.Н. Тохтамышев, А.А. Сафронов,  
**С.А. Ботников**, А.С. Лоскутов, В.А. Моргунов, С.В. Соломин // Сборник  
трудов XVII международного конгресса сталепла-  
вильщиков и произво-  
дителей металла. – Магнитогорск: ПАО «ММК», 2023. – С. 401-407.

Подписано в печать 19.01.2024  
Формат 148x210/12. Бумага офсетная.  
Печать лазерная. Тираж 100 экз. Заказ № 7.  
Отпечатано в типографии «Активист».  
Адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 74Б.