

На правах рукописи



БОТНИКОВ Сергей Анатольевич

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

Специальность 05.16.02 –
Металлургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ(НИУ)» на кафедре «Материаловедение и физико-химии материалов».

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

Официальные оппоненты:

Падерин Сергей Никитович – доктор технических наук, профессор;

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»), г. Магнитогорск;

Кожухов Алексей Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой, заместитель директора по науке и инновациям Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (СТИ НИТУ «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 29.09.2021 г. в 14:00 в ауд. 1001 главного учебного корпуса на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 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/d-21229801/botnikov-sergey-anatolevich>.

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 «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

2



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]_{общ}, 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. За прошедшие десятилетия требования, предъявляемые к «чистой стали», существенно возросли. За рубежом «чистая сталь» – это, в первую очередь, сталь с низким содержанием включений оксидов, сульфидов и газов.

В диссертационной работе под «чистой сталью» автор также подразумевает сталь, раскисленную алюминием, с низким содержанием оксидных (общий кислород) и сульфидных неметаллических включений (сера), а также примесей фосфора и газов – азота и водорода. В диссертационной работе не рассматривается влияние на качество металлопродукции цветных примесей (Cu, As, Sn, Sb и др.), углерода и других видов неметаллических включений. Следует отметить, что один и тот же элемент может быть как полезным, так и вредным. Например, сера и фосфор, обычно являются вредными примесями, но могут быть легирующими элементами в автоматных сталях. Аналогичная ситуация наблюдается с азотом. С одной стороны – это вредный элемент, охрупчивающий сталь. С другой стороны, он применяется как легирующий элемент для нитридного упрочнения стали, измельчения зерна и т.д. Одним из немногих элементов, влияние которых всегда остается отрицательным, является кислород и продукты его взаимодействия с компонентами стали – неметаллические включения. Поэтому на проблеме кислорода и неметаллических включений в первую очередь должно быть сфокусировано внимание на получении «чистой» и «сверхчистой стали». Здесь важны не только отдельные технологические операции, обеспечивающие низкий уровень растворенного кислорода и удаление образующихся неметаллических включений, но и комплексный контроль при последующем блокировании всех источников вторичного кислорода. Такими источниками могут быть: атмосферный воздух, присаживаемые материалы, остаточный окисленный шлак и футеровка.

В мире есть аналоги решения подобной проблемы. В Японии впервые была поставлена и решена задача получения подшипниковой стали с содержанием общего кислорода менее 0,0015 мас. %. Этот уровень кислорода в подшипниковой стали превратился со временем в мировой стандарт качества. Именно на таком уровне выплавляют подшипниковую сталь, например, на «ОЭМК» (г. Старый Оскол). Однако, подшипниковая сталь содержит

1 мас. % углерода и температура ликвидус у неё на 50-70 °С ниже, чем у типичных конструкционных сталей, содержащих 0,1-0,3 мас.% [С]. Это означает, что равновесный уровень концентрации кислорода при раскислении алюминием у конструкционных сталей будет существенно выше. Кроме того, температура перегрева над ликвидусом при разливке конструкционных сталей в несколько раз выше, чем у подшипниковой стали. В совокупности эти и другие факторы делают получение высококачественной конструкционной стали особой отдельной проблемой, требующей для своего решения новых подходов в теории и практике сталеварения.

Высококачественная сталь с низким содержанием вредных примесей, неметаллических включений и газов становится всё более востребованной. Требования, которые выставляет потребитель (машиностроение, энергетика и транспорт) сталеплавильному производству непрерывно возрастают. Имеется много частных разработок в области технологии получения стали высокой чистоты (далее по тексту – «чистая сталь»). Однако, до сих пор отсутствует **универсальный подход к разработке, внедрению и обеспечению стабильного функционирования технологии получения стали высокой чистоты в условиях современного сталеплавильного производства.**

К проблемам сталеплавильного производства при освоении технологий получения «чистых сталей», которые связаны с уровнем содержания кислорода и неметаллических включений, можно отнести следующие: брак металла по неметаллическим включениям (поверхностные и внутренние дефекты, снижение механических свойств металлопродукции), вторичное окисление металла, нестабильная разливка на установке непрерывной разливки стали (УНРС) (затягивание погружных стаканов включениями или их «смывы» в слиток), значительные затраты времени на подбор шлакообразующей смеси для кристаллизатора УНРС (поиск оптимума) и возникновения прорывов металла на УНРС (аварийная остановка) и др.

В этих условиях существенно повышается необходимость поиска новых подходов к решению указанных проблем и дальнейшее исследование 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 20-30 лет, требуется комплексный подход с учётом теории и практики вопросов для их дальнейшего решения. Одной из наиболее важных проблем является проблема вторичного окисления стали, раскисленной алюминием, в том числе во время разливки.

Также является проблемой наличие «смывов» тугоплавких отложений с поверхности разливочного стакана или стопора в кристаллизатор, что негативно влияет на физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе и в итоге может быть причиной получения брака металлопродукции по неметаллическим включениям. Как решить эту задачу и в каком направлении необходимо развивать технологию? Сегодня этот вопрос 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 технологии получения стали с повышенными требованиями 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. Разработан и внедрен в работу программный модуль (термодинамический модуль SyTherMa^{*}) для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газа с использованием принципов термодинамики.

3. Разработаны основы технологии производства «чистой стали» с применением программы SyTherMa (STM) и математической модели прогнозирования температуры в промежуточном ковше при разливке каждой конкретной плавки на УНРС (модель построена на принципах алгоритма машинного обучения и внедрена на производстве).

4. Разработаны и внедрены эффективные мероприятия, снижающие случаи «смывов» тугоплавких неметаллических включений с разливочного стакана промежуточного ковша.

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

6. Определены условия образования металлургических дефектов, причины их возникновения и внесены соответствующие корректировки в классификатор дефектов (причины, сопутствующие причины, способы предупреждения, обработка дефекта и влияние на прокат) с учётом их влияния на качество металлопродукции.

* Программа SyTherMa-равновесие (V. 3.4.3). Группа разработчиков: Котельников Г.И., Толстоуцкий А.А., Ботников С.А.

7. Предложена новая интерпретация классификации чистоты стали в соответствии с современными представлениями и тенденциями по содержанию в ней общего кислорода, серы, фосфора, азота, водорода и объёмной доли включений, а также введено новое понятие – «суперчистая сталь».

8. Предложен новый метод мониторинга и контроля технологии производства «чистой стали», заключающийся в создании уникального комплекса интеллектуальных и аппаратных средств, позволяющего быстро разрабатывать инновационные технологии получения «чистой стали» и обеспечивать их стабильное функционирование.

9. Разработан и внедрён комплекс технологических мероприятий производства «чистой стали» на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла.

10. Разработан и внедрён алгоритм корректировки технологии производства «чистой стали», связанный со снижением содержания в металле неметаллических включений с учётом негативных элементов производства «чистой стали» (вторичное окисление, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, ухудшение технологических свойств шлака в кристаллизаторе УНРС), а также с учётом набора оборудования в сталеплавильном цехе и качества применяемых материалов.

11. Разработана сквозная технология на базе комплекса предложенных мероприятий производства «чистой стали».

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

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

Методы исследования.

Прямые методы исследования неметаллических включений осуществлены: на оптическом микроскопе Axio Observer.D1m с системой анализа изображений ThixometPro, рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV, сканирующих электронных микроскопах JEOL JSM-6460LV и Ultra-55. Косвенные методы исследования неметаллических включений выполнены: методом фракционным газовым анализом на газоанализаторе LECO TCH-600 и методом термо-ЭДС с применением высокотемпературной электрохимической гальванической ячейки с эталонным электродом (Cr и Cr₂O₃) и с твёрдым электролитом ZrO₂·(MgO). Термодинамическое моделирование осуществлено в вычислительных программах для сталеплавильных процессов: Thermo-Calc и SyTherMa. Статистические методы анализа данных: построе-

ние гистограмм распределения, определение уравнения линии тренда методом наименьших квадратов и вероятностно-графические модели. Методы углубленного анализа данных: дерево принятия решений, опорные вектора, модели «случайный лес» и «градиентный бустинг». Основным методом исследования являлось опытное опробование новых разработок в промышленных условиях, которое проводилось в АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) и АО «Первоуральский новотрубный завод» (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, Г.В. Белов, А.М. Бигеев, В.А. Бигеев, А.Ф. Вишкарёв, К.В. Григорович, В.А. Григорян, Ю.А. Гудим, А.П. Гуляев, А.И. Зайцев, А.А. Казаков, В.А. Кожеуров, К.Л. Косырев, Г.И. Котельников, В.А. Кудрин, А.В. Куклев, А.В. Лейтес, Я.Н. Малиночка, Г.Г. Михайлов, А.В. Павлов, С.Н. Падерин, Д.Я. Поволоцкий, А.Г. Пономаренко, Б.А. Прудковский, В.Е. Рощин, А.А. Сафронов, А.Е. Семин, Н.А. Смирнов, А.Я. Стомахин, С.А. Храпко, А.Г. Шалимов, В.И. Явойский и др. Из зарубежных авторов: S. Abraham, J.K. Brimacombe, T. Cimorelli, L. Holappa, A.V. Karasev, R. Kiessling, J.A. Kromhout, S. Kumar, B.G. Thomas, E.T. Turkdogan, K. Wännenberg, L. Zhang и др.

Вопросы процессов вторичного окисления металла подробно освещены в работах следующих авторов: А.В. Куклев, А.В. Лейтес и А.Г. Шалимов. Вопросам одновременного контроля экзопотоков кислорода в расплав на всей технологической цепочке уделяется недостаточно внимание. В настоящее время вопросы негативных элементов производства «чистой стали» 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, 5, 8, 11, 12, 15, 16, 19, 20 паспорта специальности 05.16.02).

1. Создан уникальный комплекс интеллектуальных и аппаратных средств, позволяющий разрабатывать инновационные технологии получения чистых и сверхчистых сталей, обеспечивать их стабильное и эффективное функционирование в условиях реального современного сталеплавильного производства. Показано, что в качестве основной научной идеи созданного комплекса эффективно работает положение о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак» и контроле вторичных экзопотоков кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Эта идея обеспечивает быстрое определение критических точек в разрабатываемых и дей-

ствующих технологиях, помогает в определении эффективных способов решения возникающих проблем качества чистых и сверхчистых сталей.

2. Установлено и научно обосновано предельное содержание вредных элементов в стали, раскисленной алюминием: общего кислорода – не более 0,0020 мас. %, серы – не более 0,0030 мас. %, оксида алюминия – не более 0,0020 мас. % и оксида кальция – не более 0,0025 мас. %, превышение которых приводит к значительному снижению механических свойств и качества готовой металлопродукции за счёт формирования избыточного количества неметаллических включений.

3. Определена степень влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша на процесс общего вторичного окисления расплава при производстве высококачественной стали, раскисленной алюминием.

4. Разработана классификация дефектов, возникающих при производстве «чистой стали» по следующим признакам: природа образования (стале-плавильная или прокатная), месторасположение на металлопрокате, химический состав включений, наличие обезуглероженного слоя в самом дефекте или около него. Классификация позволяет минимизировать затраты на дорогостоящие промышленные эксперименты.

5. Показан механизм формирования продольных дефектов на непрерывнолите металле при определенных физико-химических свойствах и структуре шлака в кристаллизаторе в процессе разливки «чистой стали» на УНРС.

6. Для формирования новых принципов и методов промышленного производства стали, раскисленной алюминием, предложено ввести новую классификацию высококачественной стали по уровню её чистоты, а именно, «чистая сталь» (мас. %): $[O]_{\text{общ}} \leq 0,00500 \%$, $[S] \leq 0,02500 \%$, $[H] \leq 0,00060 \%$, $[N] \leq 0,01000 \%$, $[P] \leq 0,02500 \%$ (не более 1500 атомов на 1 млн. атомов железа) и объёмная доля включений $\leq 0,020 \%$ и «суперчистая сталь» (мас. %): $[O]_{\text{общ}} \leq 0,00150 \%$, $[S] \leq 0,00150 \%$, $[H] \leq 0,00015 \%$, $[N] \leq 0,00500 \%$, $[P] \leq 0,00800 \%$ (менее 500 атомов на 1 млн. атомов железа) и объёмная доля включений $\leq 0,015 \%$.

7. Разработан и применён новый алгоритм корректировки технологических режимов производства высококачественной стали, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле параметров отдельных элементов всей технологической цепочки, учитывающей взаимосвязанность работы отдельных агрегатов.

8. Предложен подход к организации промышленного производства, охватывающий все переделы получения высококачественной стали, который позволяет внедрить единую систему автоматизированного управления про-

изводством, решающую задачи оптимального управления по таким показателям как себестоимость, темп производства и качество получаемой стали.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке научных основ сквозной технологии получения высококачественной раскисленной алюминием стали с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов в рамках разработанного автором уникального комплекса интеллектуальных и аппаратных средств, модели расчёта взаимодействия компонентов металла, шлака и газовой фазы с целью контроля и управления окислительным потенциалом системы с учётом внешних потоков кислорода.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что полученные в работе научные результаты являются основой создания современного подхода в разработке и внедрении технологии производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве. Предложены новые технологические решения при производстве «чистой стали», 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. Исключено разногласие по источнику возникновения дефектов стали и осуществлен выход на необходимые мероприятия для каждого конкретного случая и металлургического предприятия. Теоретические результаты работы могут быть использованы для разработки новых марок стали в приоритетных направлениях развития промышленности: машиностроении, энергетике и транспорте. Показан новый путь применения комбинации углубленного анализа данных и традиционных методов исследований в металлургическом производстве для выявления первопричин проблем и выбора значимых технологических параметров. Удельный суммарный экономический эффект от проделанной работы на металлургическом предприятии может варьироваться от 2 до 5 долл. США на 1 тонну непрерывнолитой стали.

Реализация результатов работы. Разработана техническая документация сквозной технологии производства «чистой стали», 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 Выксунского металлургического завода». В условиях АО «Выксунский металлургический завод» разработаны и внедрены в работу следующие

документы: технические требования на глинозёмсодержащие материалы (ТТ 057574848-137-2017), карбид кальция в контейнерах и его ввода в жидкий металл механическим способом (ТТ 05757848-144-2017); алюминий вторичный марки АВ91 для раскисления жидкого полупродукта (ТТ 034-73797897-2016); ферросиликомарганец (ТТ 05757848-141-2017); шлакообразующие смеси и огнеупорные материалы для промежуточного ковша; «Классификатор основных дефектов рулонного и листового металлопроката производства Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» (КДФ.20-63.959.168); методика «Количественная металлографическая оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями с помощью автоматического анализа изображения» (М.20-63.272.156); регламент «Расследование причин возникновения колебаний уровня металла в кристаллизаторе, затягивания металлопроводки промежуточного ковша неметаллическими включениями, образования прорывов кристаллизующейся корочки металла» (Р.11-63.093.66); регламента испытаний новых материалов на УНРС «Проведение испытаний огнеупоров стальпроводки, торкрет-масс промежуточного ковша, шлакообразующих смесей в кристаллизаторе, ассимилирующих и теплоизолирующих смесей в промежуточном ковше» (Р.11-63.093.69).

По результатам всего организационного проекта «чистая сталь» в АО «Выксунский металлургический завод» был получен экономический эффект 269 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; уменьшена объёмная доля неметаллических включений в 1,5 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 разлива 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 ис-

пытаний, 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. Разработанный программный модуль STM для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газа с использованием принципов термодинамики, обеспечивающий оценку окисленности системы «металл-шлак» и уровня внешних потоков кислорода из атмосферы, материалов и футеровки.

3. Элементы сквозной технологии производства «чистой стали», разработанные с применением программного модуля STM и прогнозной модели температуры металла в промежуточном ковше УНРС.

4. Разработанные мероприятия, снижающие случаи «смывов» тугоплавких неметаллических включений с разливочного стакана промежуточного ковша в слиток.

5. Степень влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша УНРС на вторичное окисление стали, установленная с применением программного модуля STM и промышленных экспериментов.

6. Параметры разделения природы образования металлургических дефектов.

7. Результаты классификации высококачественной стали по содержанию вредных примесей и объемной доли включений.

8. Созданный метод мониторинга и контроля производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве.

9. Комплекс технологических мероприятий от выплавки жидкого полупродукта до разливки и кристаллизации металла на УНРС для обеспечения производства «чистой стали».

10. Созданный алгоритм корректировки технологических режимов производства высококачественной стали, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле параметров отдельных элементов всей технологической цепочки.

11. Разработанная технология получения «чистой стали» на базе комплекса предложенных мероприятий и подхода к организации промышленного производства, охватывающая все переделы получения высококачественной стали, обеспечивающая высокий выход годной металлопродукции.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на Международной конференции «Технологии и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали» (г. Москва, 2009); 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: сырье, 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 «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).

Публикации. Всего по материалам диссертации опубликовано 44 печатных работ, в числе которых 12 в изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки России, 11 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus и один патент на изобретение.

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 и расчёты оценки вторичного окисления металла – лично автором. Автору принадлежит анализ и интерпретация результатов, формулировка

научных основ разработки технологии производства «чистой стали», основных положений и выводов. Для разработанной технологии скорректированы требования к применяемым материалам и лично автором диссертации был реализован организационный проект «Чистая сталь» в действующем электросталеплавильном цехе и запатентован термин «суперчистая сталь».

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, содержащего основные выводы и результаты исследований, списка литературы из 276 наименований и 6 приложений. Общий объём работы составляет 364 страницы, в том числе основного текста – 301 страница. Работа содержит 62 рисунка, 37 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 вредных примесей, неметаллических включений 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. В аналитическом обзоре литературы рассмотрено влияние оксидов и сульфидов или их комбинаций на свойства высококачественных сталей; методы снижения содержания этих включений в стали и в сталеплавильном производстве; применяемые технологии на предприятиях для улучшения эксплуатационных свойств металла. 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 «чистой стали» посвящена созданию 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 комплексов (программ) для расчёта термодинамического равновесия, применяемых в ме-

таллургии: TEPRA, MPE, MTDATA, Thermo-Calc, FactSage, ГИББС 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 «чистая сталь» была поставлена задача создать «удобный» калькулятор для термодинамических расчётов металлургических процессов, происходящих в реальных системах: сталеразливочный ковш, промежуточный ковш и кристаллизатор.

Термодинамический модуль программного комплекса SyTherMa (STM) на основании взаимодействия компонентов в системе «металл-шлак-газовая фаза» с использованием принципов термодинамики обеспечивает расчёт состава и массы металла, шлака и газовой фазы. Были добавлены в базу новые материалы, которые сейчас используются на предприятиях чёрной металлургии РФ, а также расширена база констант равновесий химических соединений для промышленных расчётов (до 85 компонентов): фторидов – 2; оксидов – 58; сульфидов – 7; нитридов – 7; карбидов – 7; чистых газов – 4. Химические составы часто применяемых материалов на практике были перепроверены в сертифицированной лаборатории и внесены в базу программы STM.

Входные данные термодинамического модуля STM: температура системы, давление системы, вектор масс элементов (m_1, m_2, \dots, m_i), вектор коэффициентов неравновесности (α_1, α_2 , и т.д.). По умолчанию эти коэффициенты принимаются равными 1. Они показывают на сколько система не достигает равновесия на разных этапах расчёта процесса. Может быть, как меньше, так и больше 1. Коэффициенты неравновесности подбираются по 2-3 промышленным плавкам. Выходные данные термодинамического модуля STM: химические составы и массы металла, шлака и газовой фазы. При необходимости можно рассчитать коэффициенты активности компонентов металла и шлака, а также парциальное давление компонентов газовой фазы.

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). Также в STM можно применять и другие модели, для уточняющих и проверочных расчётов. Например, расчёты по металлу: модель бесконечно разбавленных растворов и теория субрегулярных растворов, а по шлаку – совершенный (идеальный) раствор и модель раствора как фазы, имеющей коллективную электронную систему (МКЭ).

Для проверки адекватности программы STM в главе 3 выполнено три вычислительных эксперимента: выпуск плавки из дуговой сталеплавильной печи; оценка критического поступления кислорода в расплав в период внепечной обработки стали; изменения, происходящие в промежуточном ковше при серийной разливке на УНРС и оценка вторичного окисления металла в промежуточном ковше. На сегодняшний день эти примеры имеют большое значение для теории и практики современного сталеплавильного производства стали с низким содержанием неметаллических включений.

С целью решения задачи по поддержанию температуры металла в промежуточном ковше в заданном «узком» интервале (15-30 °С выше температуры ликвидус) был применён новый комбинированный подход совершенствования технологии производства стали с использованием методов углубленной аналитики (Advanced Analytics) и машинного обучения (Machine learning) с применением «больших данных». Для реализации этого подхода использовался структурированный способ внедрения элементов углубленной аналитики, который включает в себя следующее: 1 – подготовка до внедрения на производстве (создание массива данных, выполнение предварительного анализа, построение модели, корректировка и совершенствование модели); 2 – внедрение в работу.

Соблюдения заданных интервалов температуры в промежуточном ковше во время разливки являются одной из ключевых задач поддержания высокого качества непрерывнолитого металла. В мировой практике выполнение требований по соблюдению перегрева металла в промежуточном ковше в диапазоне 15-30 °С считается достаточно сложной задачей, решаемой с применением современных способов снижения тепловых потерь, мониторинга и контроля. Одной из проблем является исключение случаев резкого изменения температуры металла во время разливки, связанных с различными технологическими особенностями или ошибками во время внепечной обработки стали (блокировка продувочной пробки, сталеразливочный ковш после ремонта, временные задержки и др.). Исследования показывают, что изменение температуры разливки стали на 5-10 °С может существенно изменить условия истечения стали в кристаллизатор и её поведение при кристаллизации. Поэтому задача контроля температуры в ходе разливки и исключение резких её перепадов является ключевой.

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 литейно-прокатного комплекса

АО «ВМЗ» (далее по тексту – ЛПК), применяя статистические модели и учитывая особенности технологического процесса.

На первом этапе осуществлена разработка самой модели путём интеграции двух подходов: алгоритма машинного обучения и вероятностно-графической модели (ВГМ и байесовские сети). Первый подход даёт точечную оценку промежуточных и конечных температур конкретной плавки, а второй позволяет оценить вероятностное распределение. ВГМ подход очень перспективен для ситуации с пропущенными, неправильными и неопределёнными входными данными, которые часто встречаются на металлургических предприятиях.

На втором этапе была выполнена интеграция модели в систему АСУ ТП цеха (автоматизации цеха), которая позволила обеспечить контроль выполнения технологических параметров в режиме реального времени. Модель применяется в качестве советника для технологического персонала установки «ковш-печь» (УКП) и вакууматора. 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, а также получена экономия электроэнергии до 0,75 кВт·ч/т и расхода графитированных электродов до 1 % на УКП. Также был выявлен перечень релевантных технологических параметров, который был учтен для разработки технологии «чистая сталь». Уровень точности прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше УНРС достиг до 6 °С.

Третья глава «Анализ комплекса мероприятий производства высококачественной стали» посвящена анализу всего комплекса мероприятий производства и разработки технологии «чистая сталь».

В комплексе рассмотрены технологические процессы раскисления и шлакообразования в сталеразливочном ковше, попадания окисленного печного шлака в ковш с применением термодинамических расчётов с использованием программы STM. Это позволило разработать и внедрить раздельную схему ввода материалов из разных промежуточных бункеров на выпуске плавки с одновременной корректировкой химического состава шлака. До этого материалы отдавались в ковш из одного бункера. Кроме этого, с целью получения жидких шлаков в ковше следует выполнять корректировку расхода раскислителей и шлакообразующих материалов на выпуске плавки.

Выбраны целевые значения по отношениям CaO/SiO_2 и $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ необходимые значения по содержанию в ковшевом шлаке оксидов с целью получения температуры плавления его от 1455 до 1470 °С: $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 5,0$; $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 1,9$; $\text{SiO}_2 \leq 10$ мас. %; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 24$ мас. %. Произведено термоди-

намическое моделирование в программе STM попадания печного шлака от 1 до 31 кг/т в сталеразливочный ковш, с целью определения изменения его химического состава для низкоуглеродистой К56 (химический состав жидкого полупродукта: $[C] - 0,03$ мас.%; $[Mn] - 0,060$ мас.%; $[Si] - 0,009$ мас.%; $[O]_{\text{раст.}} - 0,060$ мас.%) и среднеуглеродистой стали 20 (химический состав жидкого полупродукта: $[C] - 0,080$ мас.%; $[Mn] - 0,150$ мас.%; $[Si] - 0,020$ мас.%; $[O]_{\text{раст.}} - 0,055$ мас.%). В расчётах учтена фактическая технология ввода раскислителей ($FeAl50$ и CaC_2), легирующих ($FeSi65$, $FeSiMn17$ и $FeMn965$) и шлакообразующих материалов (CaO и Al_2O_3) в сталеразливочный ковш для условий ЛПК. На рисунке 1 представлены расчёты в STM.

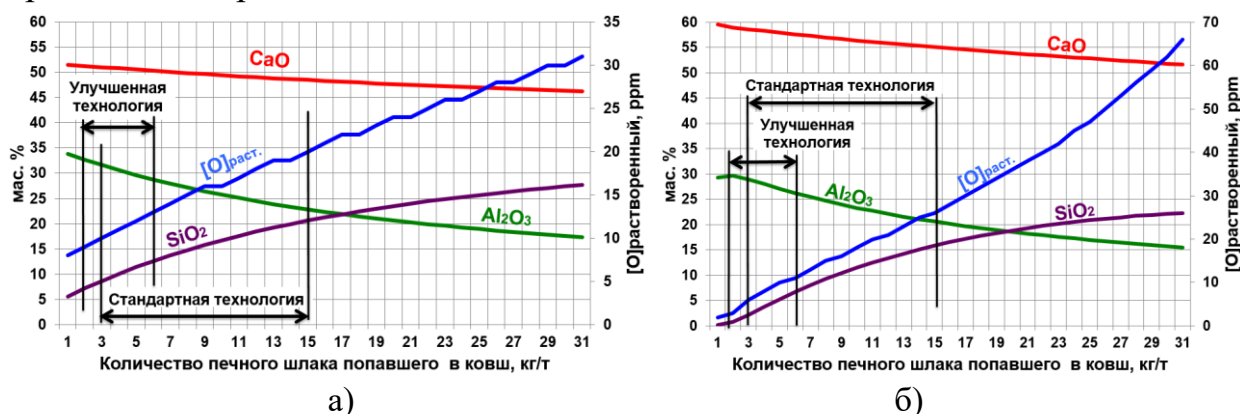


Рисунок 1 – Изменение состава шлака в ковше и содержание растворенного кислорода $[O]_{\text{раст.}}$ в металле в зависимости от количества попавшего печного шлака для низкоуглеродистой К56 (а) и среднеуглеродистой стали 20 (б)

Снижение количества печного шлака, попадающего в металл не более 6 кг/т, стабилизирует получение необходимого ковшевого шлака по химическому составу, который довольно быстро можно скорректировать на внепечной обработке стали. Полученная информация по термодинамическому моделированию позволила усовершенствовать и скорректировать технологию производства «чистой стали» для трубного сортамента.

На основании этой работы были разработаны и реализованы следующие мероприятия для получения оптимального состава шлака в ковше без потери сульфидной ёмкости: улучшения первичного раскисления CaC_2 и Al ; отдельный ввод материалов на выпуске плавки в ковш; интенсивная продувка металла аргоном на все пробки около 6,0 л/т·мин на печном сталевазоне не менее 3 минут; исключение раскисления шлака в ковше карбидом кремния (SiC); улучшения десульфурации в ковше за счёт раскисления шлака алюминиевыми гранулами; исключение в технологии шлакообразования материалов, повышающих в шлаке содержание SiO_2 (флюорит CaF_2 и карбид кремния SiC). Практика работы на улучшенном шлаке в сталеразливочном ковше показала следующие преимущества: на протяжении всего периода

внепечной обработки шлак в ковше жидкий и не требует добавления флюорита; шлак с высокой основностью CaO/SiO_2 и с содержанием $\text{SiO}_2 \leq 10$ мас. % менее активен к алюминию в металле, то есть минимальный процесс окисления алюминия до Al_2O_3 ; низкая эрозия (износ) футеровки сталеразливочного ковша за счёт исключения применения флюорита; расход алюминиевой катанки ниже на 20 %.

На основании проделанной работы была выполнена доработка программы STM и добавлен специальный раздел «Выпуск». Данный раздел необходим для осуществления комплексных расчётов раскисления, легирования и шлакообразования на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата, с учётом технологических ограничений, с целью поиска лучшей экономической технологии (самая низкая себестоимость). Выполненные расчёты были сопоставлены с промышленными данными, которые согласуются с потреблением ферросплавов и шлакообразующих материалов в промышленных процессах производства стали, а в некоторых случаях расчётные расходы были ниже, чем используются на практике. Входные данные расчёта «Выпуск»: масса и химический состав металла и шлака печи; поступление кислорода (подсосы); температура; давление; типичные данные (средние за последние 10-50 плавов) по вводу материалов в ковш.

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 заданных 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 ограничения и фиксированные или переменные данные следует изменить. С применением раздела «Выпуск» в программе STM на практике сократило время на расчёты для разработки технологии «чистая сталь» до нескольких часов.

Чрезмерная аргоновая продувка жидкого расплава в сталеразливочном в ковше, особенно для сталей, раскисленных алюминием, приводит к активизации процесса вторичного окисления через оголенные участки жидкого расплава, таким образом загрязняется сталь оксидными неметаллическими включениями. Формирование тугоплавких шлаков с температурой плавления более 1650°C приводит к систематическому использованию агрессивного флюса (флюорита) и повышению интенсивности аргоновой продувки до 800 л/мин и более на один продувочный узел. С другой стороны, жидкий шлак в сталеразливочном ковше обеспечивает внепечную обработку стали на низких расходах аргона, а также снижение поступления кислорода с 0,50-0,80 до 0,15-0,30 кг/т (расчётные данные по программе STM).

На основе расчётов в программе STM и сопоставление окисления алюминия до Al_2O_3 и интенсивности продувки установлен максимальный допустимый уровень поступления кислорода в расплав на установке «ковш-печь» – не более 0,20 кг/т. Результаты термодинамического моделирования в STM технологии внепечной обработки «до» и «после» реализации корректировки технологических режимов подачи аргона для сталеразливочного ковша представлены на рисунке 2.

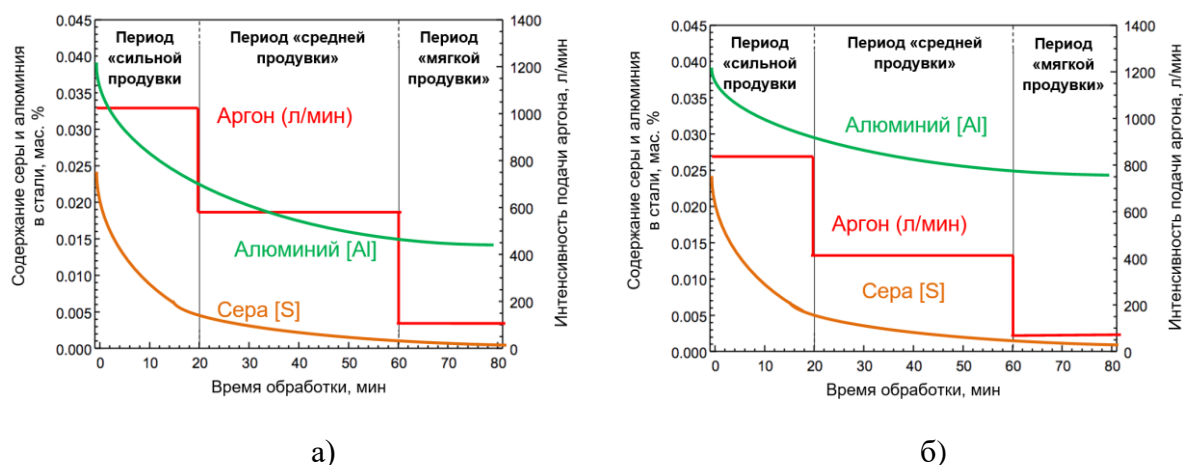


Рисунок 2 – Результаты термодинамического моделирования в STM технологии внепечной обработки «до» (а) и «после» (б) в зависимости от интенсивности подачи аргона в сталеразливочный ковш

В таблице 1 представлен разработанный режим продувки расплава в сталеразливочном ковше инертным газом (л/т·мин) и диаметра пятна продувки (мм).

Таблица 1 – Режим продувки сталеразливочного ковша инертным газом для производства «чистой стали» и «суперчистой стали»

Режим продувки	Технологические операции	Суммарный расход инертного газа, л/(т·мин)		Диаметр пятна продувки, мм
		минимум	максимум	
Начало продувки	Раздув продувочных блоков до ввода алюминиевой проволоки	–	10,0	не контролируется
Сильная продувка	Начальная десульфурация	5,0	7,5	не более 400 мм
Средняя продувка	Нагрев, добавление материалов и среднее охлаждение металла	2,5	5,0	не более 300 мм
Нормальная продувка	Нагрев, добавление материалов	1,2	2,5	не более 150 мм
Мягкая продувка	Ввод модифицирующей кальциевой проволоки и продувка расплава без оголения зеркала	0,5	1,0	пятно продувки отсутствует
Очистительная продувка	Завершающее удаление неметаллических включений	0,5	1,2	

Проведенные исследования показали, что из-за огромного числа влияющих факторов на работу продувочных пробок следует определять диаметр пятна продувки с применением специальной комбинированной цифровой камеры (визуальная и инфракрасная съёмка), которую следует установить под водоохлаждаемый свод УКП или вакууматора.

Режимы мягкой и очистительной продувки обеспечивают минимальное поступление кислорода в расплав (не более 0,20 кг/т), главной целью которой является обеспечение производства стали со сверхнизким содержанием оксидных включений. После того как концентрация серы в металле достигает значений ниже 0,0030 мас. %, интенсивность продувки следует снижать таким образом, чтобы исключить вторичное окисление расплава через атмосферу воздуха и обеспечить полное всплытие неметаллических включений в шлак.

В литературном обзоре главы 1 было показано, что в настоящее время в современной металлургии успешно решена задача по разливаемости раскисленной алюминием стали с применением модифицирующей обработки кальцием совместно с мероприятиями, исключающими процессы вторичного окисления металла на производстве. Несмотря на это, следует дополнительно обращать внимание на модифицирующую обработку металла кальцием для лучшей разливаемости на УНРС, а также следует обеспечивать низкую концентрацию серы в металле ($< 0,0030$ мас. %) с целью полной модификации сульфидных включений.

Дополнительно при разработке технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС были учтены два следующих момента.

Во-первых, при отношении $\text{CaO}/\text{Al}_{\text{окс}}$ более 1,5 образуются сульфиды кальция (CaS). На практике, где содержание серы менее 0,0030 мас. % это не выполняется, но если рассматривать практику работы, то локально в местах, где идёт процесс восстановления серы (ресульфурация) из шлака промежуточного ковша в металл, образуются сульфиды кальция. Принципиальным в этом моменте необходимо учитывать отношение $\text{CaO}/\text{Al}_{\text{окс}}$, как элементы в неметаллических включениях. При попытке перевести к отношению $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$ следует понимать, что эти элементы в оксидах. То есть кальций в виде CaO и алюминий в виде Al_2O_3 или $\text{Al}_{\text{окс}}$. Если про кальций можно утверждать, что он весь в оксидах (по термодинамике и металлургической практике), то алюминий связан с кислородом и может находиться в чистом металлическом виде. Оксид алюминия в металле $\text{Al}_{\text{окс}}$ зависит от процесса а заводе, в цехе, так как у всех разная практика, и более того значение $\text{Al}_{\text{окс}}$ может колебаться на каждой плавке. Это ключевой момент, сколько действительно необходимо добавить кальция в металл, чтобы успешно модифицировать алюминаты и получить жидкие и безвредные неметаллические

включения. При этом следует отметить, что сульфид кальция CaS больше вторичен и определяется содержанием серы и затем содержанием Ca в расплаве. То есть, чем больше этих элементов, тем больше вероятность протекания реакции с образованием CaS.

Во-вторых, в отношении $[Ca]/[Al]$ следует брать мольные доли кальция и алюминия в составе неметаллических включений. Это важно для определения корректного отношения. Получается, что для сталеразливочного ковша необходимы одни отношения, они как правило выше, а для промежуточного ковша УНРС другие. Так как кальций по технологии сталеплавильного производства, после ввода его в сталеразливочный ковш, больше в процессе не добавляется, а может только снижаться из-за ассимиляции шлаком, то его следует вводить на верхний предел $[Ca]/[Al]$ примерно 1,0-1,4 и далее следует определиться на практике на сколько будет снижена концентрация кальция на последней стадии внепечной обработки в ковше. $Al_{окс}$ из-за процесса вторичного окисления будет увеличиваться или оставаться на том же уровне. В ближайшее время на практике от подсосов воздуха не получится полностью избавиться, поэтому $Al_{окс}$ или Al_2O_3 в металле будет только увеличиваться. Для проверки на сколько будет увеличиваться $Al_{окс}$ и снижаться кальций, следует проводить эксперименты на практике для соответствующего производства как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах. Такой эксперимент был сделан в рамках данной диссертационной работы и были разработаны рекомендации производства «чистой стали» для условий ЛПК, которые представлены ниже.

1. Для достижения высокой степени чистоты стали по оксидам необходимо соблюдать временные интервалы по вводу алюминиевой ($Al_{пр}$) и кальцийсодержащей ($Ca_{пр}$) проволоки, а также режимы продувки расплава согласно схеме на рисунке 3.

2. Необходимо выдерживать продолжительность между вводом алюминия и кальция для сталеразливочных ковшей емкостью до 210 тонн не менее 12 мин, а для ковшей емкостью более 210 тонн не менее 14 мин.

3. Перед вводом в металл кальция, содержание связанного алюминия ($Al_{окс}$) должно быть менее 0,0020 мас. % и серы менее 0,0030 мас. %. Расход кальция на модифицирование включений должен обеспечить попадание в отношении общего содержания кальция к алюминию $[Ca]/[Al]$ от 0,08 до 0,14 или связанного кальция к алюминию в сталеразливочном ковше $(CaO)/(Al_{окс})$ от 0,80 до 1,40, а в промежуточном ковше $[Ca]/[Al]$ от 0,06 до 0,10 или $(CaO)/(Al_{окс})$ от 0,60 до 1,00. Целевое содержание кальция в промежуточном ковше УНРС не должно превышать 0,0025 мас. %.

4. Перед передачей плавки на вакууматор содержание алюминия должно быть таким, чтобы после проведения вакуумирования его больше

не добавлять, а в случае его добавки, но не более чем на 0,01 мас. % необходимо соблюдать временные выдержки по продувке инертным газом согласно рисунку 3. В случае добавки алюминия в металл после вакуумирования более чем на 0,01 мас. % получить «чистую сталь» с низким содержанием оксидных неметаллических включений проблематично.

5. Скорость нагрева металла на УКП должна быть отрегулирована таким образом, чтобы температура жидкой стали была больше на 8-10 °С, с которой ковш будет направлен на УНРС до начала обработки кальцием.

6. Необходимо выдерживать соответствующую скорость ввода кальцийсодержащей проволоки в металл (ориентировочная скорость около 220 ± 20 м/мин).

7. «Очистительная» продувка металла с суммарным расходом инертного газа не более 1,2 л/т·мин после ввода кальция должна быть не менее 8 минут.

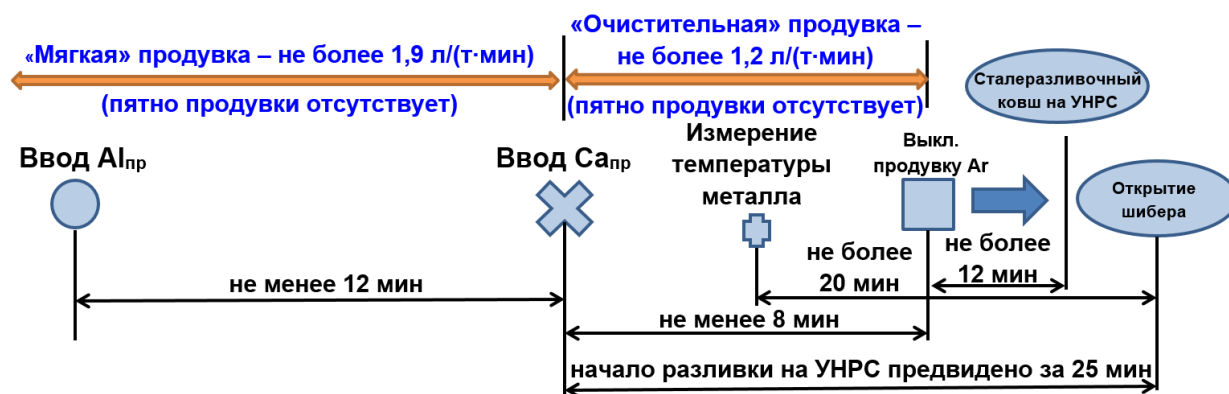


Рисунок 3 – Схема добавления в металл алюминия и кальция в завершающий период обработки на установке «ковш-печь» или вакууматоре перед передачей плавки на УНРС (патент № 2740949)

Реализация мероприятий модифицирования включений кальцием привело к более лучшей разливаемости стали на УНРС, то есть установлено снижение случаев затягивания разливочных стаканов тугоплавкими включениями. Также отмечено снижение средней объемной доли включений с 0,015 до 0,010 об. % и дефектов трубе, связанных с неметаллическими включениями (плена и пузырь-вздутие) на 45 %.

В результате выполнения всей работы были установлены пороговые значения содержания неметаллических включений в высококачественных сталях через концентрацию содержания общего кислорода и серы, а также через содержание в металле оксидов алюминия ($Al_{окс}$ не более 0,0020 мас. %) и кальция ($[Ca]_{общ}$ не более 0,0025 мас. %). Излишки $Al_{окс}$ и кальция или неоптимальный состав включений приводили к образованию сталеплавильных дефектов и к ухудшению механических свойств готовой металлопродукции.

Фазовый состав отложений, отобранных от разливных стаканов, когда отмечалось затягивание стакана на УНРС, состоит из тугоплавких оксидов: Al_2O_3 , $FeO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot 6Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$. Фазовый состав отложений, когда отсутствовало затягивание на УНРС, преимущественно был из жидких оксидов: $CaO \cdot 2Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $12CaO \cdot 7Al_2O_3$. Это было подтверждением того, что разработанная технология приводит к улучшению разливаемости стали на УНРС и снижению «смывов» отложения с разливного стакана в слиток.

Важно сохранить полученную чистоту стали по включениям в сталеразливочном ковше и во время разливки 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. Также вторичное окисление в промежуточном ковше может интенсифицироваться за счёт таких процессов как турбулентные потоки металла в промежуточном ковше при открытии защитной трубы над уровнем шлака, особенностей внутренней конструкции промежуточного ковша, колебаний уровня металла в промежуточном ковше, чрезмерная аргоновая продувка металла в промежуточном ковше, химический состав огнеупоров и др.

При разливке на УНРС «чистая сталь» (по оксидным неметаллическим включениям с содержанием общего кислорода менее 0,0020 мас. %, раскисленная алюминием) подвержена активным процессам вторичного окисления, которые можно установить 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 ($Al_{окс}$) в пробе металла как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах; химический состав шлака в промежуточном ковше во время серийной разливки (концентрация MnO и SiO_2); ухудшение работы шлакообразующей смеси в кристаллизаторе (на поверхности металлопроката могут наблюдаться поверхностные 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 практике 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 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 показывают возможность протекающих реакций окисления алюминия, марганца и восстановления кремния шлака, содержащего оксид кремния. При увеличении концентрации SiO_2 в шлаке более 80 мас. % активизируется реакция окисления металла с образованием тугоплавких неметаллических включений, а также отмечается увеличение растворенного кислорода на 0,00003 мас. % (окисление только через шлак и без учёта поступления кислорода из воздуха и футеровки).

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

Проведены термодинамические расчёты (рисунок 4) для низкоуглеродистых сталей с различным содержанием марганца и кремния: сталь Ст2пс ($[\text{Mn}] = 0,25$ мас. % и $[\text{Si}] = 0,14$ мас. %) и сталь 09Г2С ($[\text{Mn}] = 1,34$ мас. % и $[\text{Si}] = 0,53$ мас. %). В расчёте получен химический состав шлака в промежуточном ковше с учётом материального баланса шлака для граничных условий (мало SiO_2 – 10-40 мас. % и много SiO_2 – 65-80 мас. %) и практических условий работы ЛПК.

Для получения низкого содержания общего кислорода (менее 0,0018 мас. % или поступление кислорода не более 0,10 кг/т) исключения поступления кислорода из воздуха будет недостаточно, необходимо еще обеспечить снижение концентрации SiO_2 в шлаке в промежуточном ковше до уровня ниже 40 мас. % (целевое значение – 25-35 мас. %). Следует отметить, что при концентрациях SiO_2 в шлаке более 60 мас. % 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.

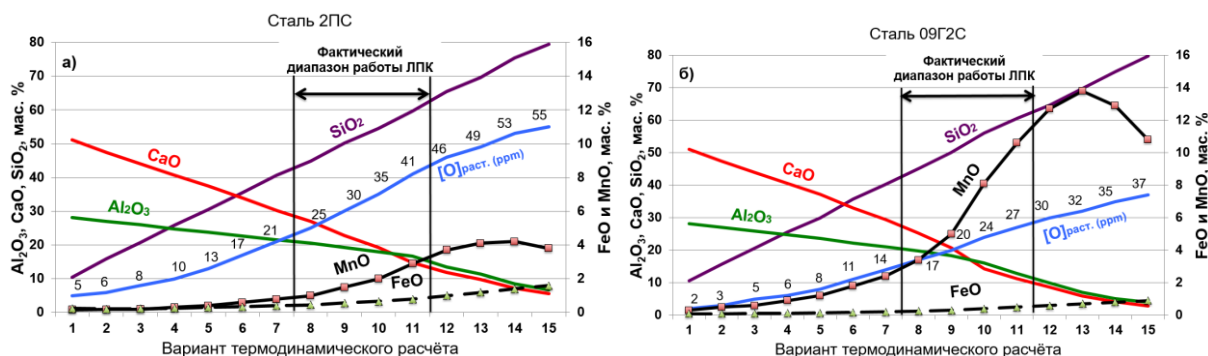


Рисунок 4 – Термодинамический расчёт в программе STM изменения состава шлака в промежуточном ковше и содержания растворенного кислорода в металле в зависимости от количества оксида кремния (SiO_2) в шлаке для трубных низкоуглеродистых сталей Ст2пс (а) и 09Г2С (б)

В условиях ЛПК во время проведения эксперимента применялась торкрет-масса типа «А» (таблица 2), 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 плавки при разливке с применением торкрет-массы типа «Б» с пониженным содержанием оксидов SiO_2 и Fe_2O_3 .

Таблица 2 – 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, мас. %					Скорость износа футеровки в шлаковом поясе на «кислом» шлаке, мм/ч
	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	
Тип «А» – природный, спеченный агломерат	≥ 85	$\leq 5,5$	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$	-	5,4
Тип «Б» – низко-железистая магнезия	$\approx 90,1$	$\approx 5,0$	$\approx 0,7$	$\approx 3,3$	$\approx 0,3$	3,2

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 – 5 %. Поэтому, в дальнейшем процесс окисления расплава на УНРС через огне-

упоры промежуточного ковша можно не учитывать. С другой стороны, если стоит задача снизить загрязнение металла экзогенными включениями на основе MgO, то рекомендуется применять в технологии торкрет-массу типа «Б» с меньшей скоростью износа рабочего слоя (таблица 2).

Таким образом, определена и установлена степень влияния на чистоту стали физико-химических свойств огнеупорных материалов, применяемых в промежуточном ковше.

При разливке «чистой стали» на УНРС было предложено автором диссертации в режиме реального времени контролировать следующие параметры процесса вторичного окисления и их граничные значения.

1. Прирост азота металла. Цель $< 0,0005$ мас. %.
2. Контроль изменения содержания химических элементов в стали (Al, Si, Mn). Цель – снижение Al $< 0,0060$ мас. %, прирост Si $< 0,0050$ мас. % и для сталей легированных марганцем, снижение Mn $< 0,010$ мас. %.
3. Контроль связанного алюминия (Al_{окс}). Цель $< 0,0020$ мас. %.
4. Онлайн мониторинг косвенного изменения физико-химических свойств шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе и образование поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле.

Оперативная оценка позволяет осуществлять поиск проблем в технологии производства «чистой стали» с разливкой на УНРС с целью быстрого и эффективного воздействия на технологию.

Кроме общеизвестных технологических приёмов получения «чистой стали», 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 магниевой шпинелью (MgO·Al₂O₃). Отрицательное воздействие магния (шпинели) в металле для электросварных труб – это негативное влияние на качество сварного шва.

В условиях ЛПК, с целью стабилизации технологии получения «чистой стали» 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 ковшепечи на постоянной основе необходим контроль химического состава всех используемых шлакообразующих материалов и состава шлака на каждой

плавке; внедрена цифровая система сбора данных по сталеразливочным ковшам, при этом ввод данных осуществляется как со стороны технологического персонала установок внепечной обработки, так и со стороны персонала, производящего ремонт и обслуживание огнеупоров ковшей с целью обеспечения единого информационного поля и прозрачности технологии; работу продувочных фурм в ковшах следует осуществлять на непрерывном контроле со стороны персонала внепечной обработки стали и огнеупорщиков; технологический и вспомогательный персонал цеха максимально быстро и эффективно устраняет все возможные причины неудовлетворительной продувки в ковше: неудовлетворительное удаление шлака после разливки на УНРС, плохое качество используемых огнеупорных фурм, низкое качество работ по обслуживанию фурм, качество подключения аргопровода к сталеразливочному ковшу без утечки аргона через соединения и другие причины.

Выполненный ряд мероприятий с учётом всех технологических аспектов производства «чистой стали» 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 мас. % до 4,5-8,5 мас. %. 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 оксид магния.

Наиболее спорным вопросом становится выяснение причин образования визуально похожих дефектов на металле, связанных с неметаллическими включениями. В условиях ЛПК решалась задача по изучению фактической чистоты металла и разрабатывался совершенно новый метод классификации и разделения дефектов стали по результатам металлографических исследований с учётом действующей технологии в сталеплавильном цехе, а также были установлены различные механизмы возникновения дефектов и определены важные технологические факторы, влияющие на образование дефектов. Самые частые дефекты, обнаруживаемые в прокате ЛПК системой PARSYTEC **, связанные со сталеплавильным производством и разливкой – это трещины, плёны, раскатанные загрязнения (рисунок 5). Дефекты могут быть, как сверху полосы, так и снизу, но чаще всего обнаруживаются именно сверху полосы из-за растягивающих напряжений и деформации на поверхности сляба. Они возникают в двух местах технологической линии УНРС:

** PARSYTEC – оптическая автоматизированная онлайн-система контроля дефектов на горячекатаной полосе с использованием 12-камер, при этом настройка автоматического классификатора дефектов производится инженером-технологом.

при изгибе сляба из вертикального положения до базового радиуса и разгибе сляба с базового радиуса до горизонтального положения.



Рисунок 5 – Распространённые поверхностные сталеплавильные дефекты на металлопрокате ЛПК, связанные с неметаллическими включениями

На основании результатов проведенных металлографических исследований предложено разделять дефект «плена» на три типа (рисунок 6): 1 – плена из-за неметаллических включений; 2 – плена из-за трещин на поверхности непрерывнолитого металла; 3 – плена, формирующаяся в процессе деформации (проката). Данное разделение плены позволяет исключить ошибки по разработке эффективных мероприятий.

В трубоэлектросварочных цехах при производстве труб из горячекатаных рулонов чаще всего встречаются следующие дефекты, связанные с неметаллическими включениями: плена, пузырь-вздутие и обнаруживаемые внутри металла неметаллические включения методами неразрушающего контроля, например, УЗК (ультразвуковой контроль) или РТК (рентгеновский телевизионный контроль).

По природе образования, по внешним и металлографическим признакам дефекты разделены на: дефекты сталеплавильного, прокатного происхождения и внутреннего строения. Установлены новые параметры разделения природы образования металлургических дефектов (сталеплавильная и прокатная) по их местам и причинам возникновения в процессе производства, которые позволили минимизировать затраты на дорогостоящие промышленные эксперименты по совершенствованию технологии.

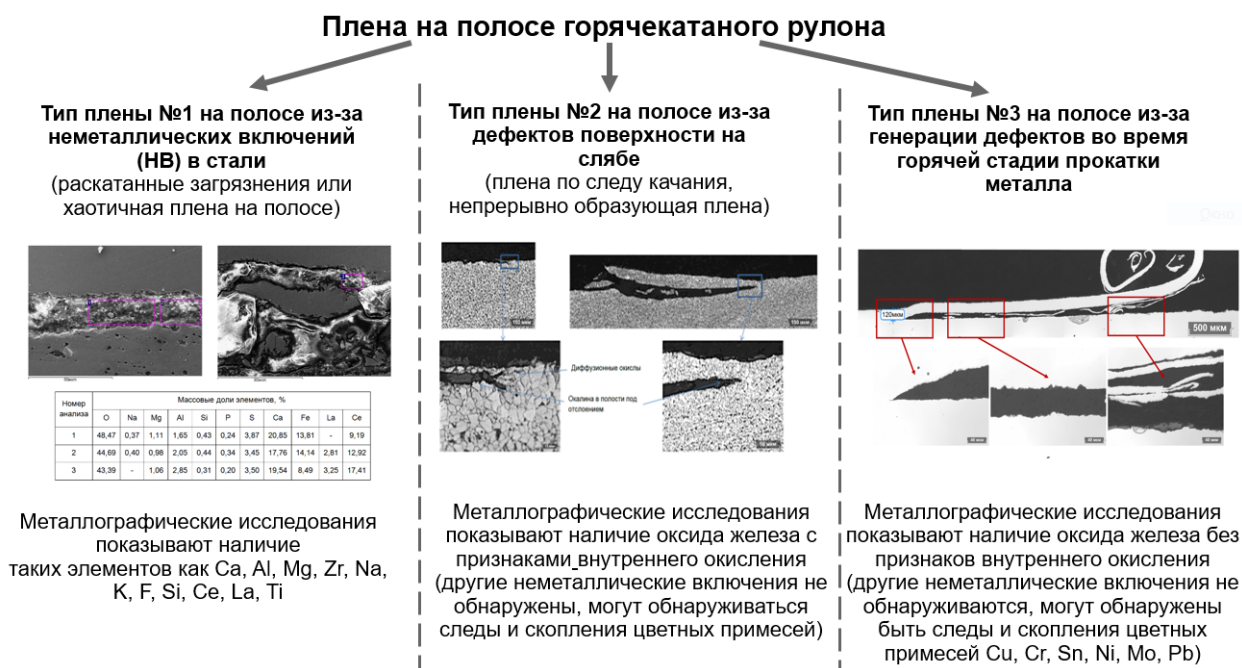


Рисунок 6 – Разделение дефекта пленки на три типа с учётом её природы образования

Из опыта работы на тонкослябовой УНРС в ЛПК были установлены четыре основных типа прорыва: 1 – подвисяние корочки металла в кристаллизаторе; 2 – прорыв из-за раскрытия продольной трещины в зоне вторичного охлаждения или прорыв через продольную ужимину; 3 – пусковой прорыв (в период запуска ручья); 4 – прочие прорывы (прорывы, связанные с конусностью узких плит кристаллизатора, неудовлетворительным состоянием оборудования кристаллизатора и др.).

В результате исследования прорывов в ЛПК были разработаны основные рекомендации по исключению и снижению образования прорывов из-за применяемых материалов, обслуживания оборудования УНРС, мониторинга и контроля тепловой карты кристаллизатора, минимизации содержания газов в металле (кислород, водород и азот) и реализации мероприятий по исключению колебаний уровня металла в кристаллизаторе путём корректировки химического состава стали, снижения содержания в ней неблагоприятных включений и общего кислорода до уровня не более 0,0020 мас. % и уменьшения (исключения) процессов вторичного окисления металла.

Внедрение и применение автоматического сбора данных для проведения факторного анализа в условиях ЛПК позволило сократить время на выявление и поиск отклонений или проблемы в 2-5 раз по сравнению с ручным сбором данных. На основании выяснения причин прорывов на УНРС оперативно производилась корректировка технологии производства «чистой стали» и работы оборудования, тем самым уменьшилось количество прорывов в 3,5 раза.

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 возникающие проблемы при разливке на УНРС «чистой стали».

В начале главы 4 был представлен литературный обзор по свойствам шлакообразующих смесей для кристаллизатора УНРС и рассмотрены вопросы, возникающие при применении ШОС на практике. Важные физико-химические характеристики ШОС для разливки на УНРС: скорость плавления ШОС (мг/с), конечная и начальная температура плавления, вязкость (Па·с), температура кристаллизации шлака и основность (CaO/SiO_2). В общем представлении ШОС для кристаллизаторов современных УНРС является смесью оксидов системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с добавками углерода, различных флюсов (Na_2CO_3 , Na_2O , K_2O , Li_2O , CaF_2 и др.).

На практике свойства ШОС для кристаллизатора не всегда прогнозируемые, как запроектировано в технологии из-за различных, 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 корунда (Al_2O_3) в жидкой стали, а также неравномерности подачи ШОС в кристаллизатор.

На практике ЛПК после реализации мероприятий производства «чистой стали» в сталеразливочном и промежуточном ковшах имеется влияние физико-химических свойств ШОС кристаллизатора на формирование дефектов поверхности на слябе. К таким дефектам относят поперечные и продольные трещины, а также захват шлака в поверхность слитка. Была поставлена задача решить проблему формирования этих дефектов путём поиска причин, корректировки технологических параметров производства «чистой стали» и физико-химических свойств ШОС.

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 «чистой стали», может привести к формированию продольных трещин на перитектических и среднеуглеродистых сталях и в меньшей степени на низкоуглеродистой стали. Это явление проявлялось при содержании в металле водорода менее 0,0002-0,0005 мас. % и общего кислорода менее 0,0020 мас. %. При этом, чем ниже содержание в металле общего кислорода и водорода, тем вероятнее образование продольных трещин. В таком случае ШОС в кристаллизаторе не изменяется, а применяется одна и та же смесь

(вязкость – 0,12 Па·с, основность CaO/SiO₂ – 1,04). Опытным путём было установлено, что эффект снижения теплопередачи в кристаллизаторе начинает проявляться при содержании водорода в расплаве металла более 0,0005 мас. %.

При низком содержании в металле водорода, теплопередача от корочки металла через шлаковую прослойку увеличивается, 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 высокой вязкостью.

В случае высокого содержания Al_{окс} в стали (обычно на практике более 0,0020-0,0030 мас. %), а также при взаимодействии алюминия в металле с оксидом кремния, возможно насыщение шлака оксидом алюминия (Al₂O₃), что приводит к формированию большого количества гарнисажа (грубой корки шлака) в кристаллизаторе с изменением его физико-химических свойств. Из-за изменения физико-химических свойств ШОС обычно увеличивается количество Al₂O₃ в шлаке (повышается вязкость) кристаллизатора, что 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 «чистой стали» рекомендуется на постоянной основе осуществлять вакуумирование металла ($[H] \leq 0,0002$ мас. %) и получать в металле низкое содержание оксидов ($[O]_{\text{общ}} \leq 0,0020$ мас. %), которые не будут изменять физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе. В случае различного содержания в металле как водорода, так и общего кислорода получить стабильные свойства шлака в кристаллизаторе на практике не представляется возможным.

На практике работы УНРС ЛПК было 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 «чистой стали» на УНРС и оптимальному подбору ШОС. Опытным путём было установлено, что влияние физико-химических свойств ШОС на теплопередачу может составлять от 6 до 15 %, 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 «чистой стали» с применением ШОС низкой основностью ($\text{CaO/SiO}_2 < 1,10$), которая применялась для условно «грязной стали», может приводить к образованию продольных трещин. Практика разливки на тонкослябовой УНРС показала, что при содержании в расплаве общего кислорода $\leq 0,0020$ мас. % и водорода $\leq 0,00050$ мас. % количество продольных трещин на слябе увеличивается (таблица 3). Были получены зависимости образования продольных трещин 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.

Таблица 3 – Влияние содержания водорода в жидкой стали на образование продольных трещин для среднеуглеродистого металла

Содержание водорода в промежуточном ковше УНРС, мас. %	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

На рисунке 7 представлен пример снижения теплопередачи в кристаллизаторе через уменьшение теплового потока на 8,3 % на широких плитах кристаллизатора. Снижение теплового потока было отмечено в конце серии с четвертой на пятую плавку с 1974 до 1810 кВт/м², которое было обусловлено увеличением водорода с 0,00020 до 0,00074 мас. % (с 2,0 до 7,4 ppm) в жидком металле.

На рисунке 8 представлен пример изменения теплового потока в кристаллизаторе во время серии плавков на УНРС из-за различного содержания общего кислорода и связанного алюминия (Al_2O_3) в металле промежуточного ковша.

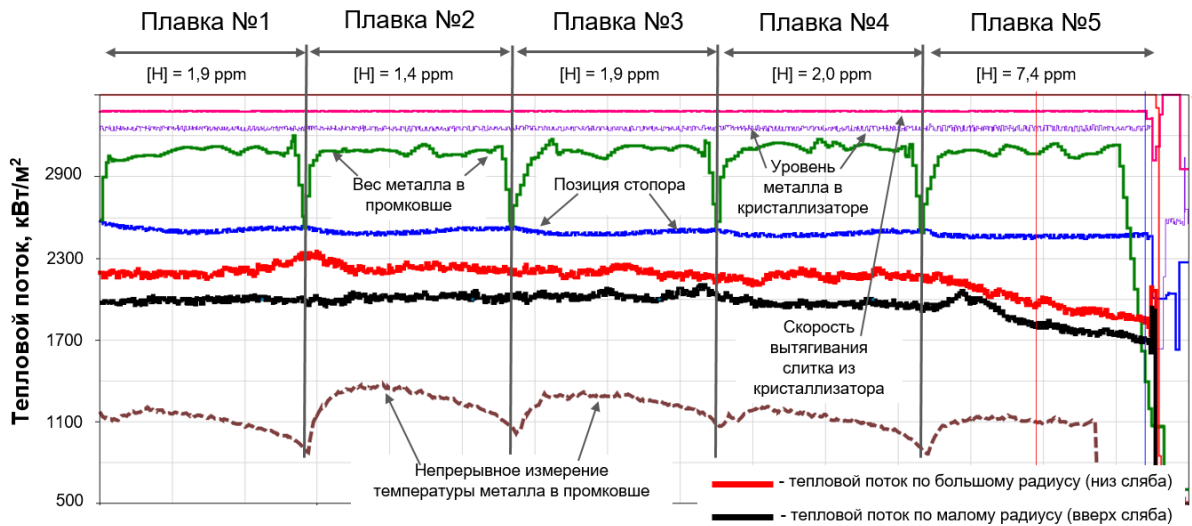


Рисунок 7 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС низкоуглеродистой стали 09Г2С ([C] – 0,06 мас. %; [Mn] – 1,35 мас. %; [Si] – 0,53 мас. %; [Al] – 0,026 мас. %); скорость вытягивания слитка 3,2 м/мин; размер сляба 1410X105 мм²

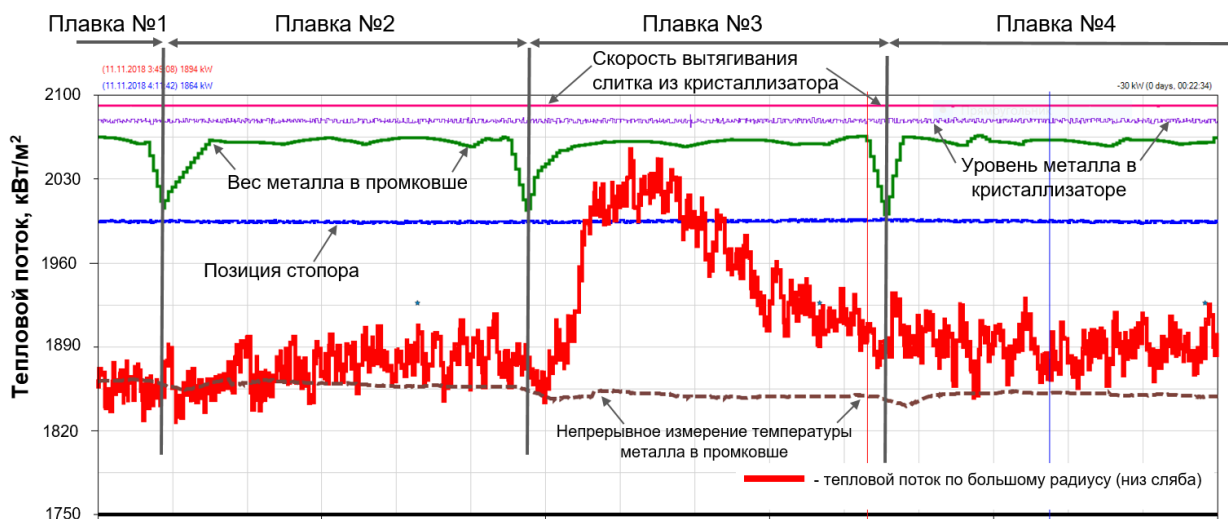


Рисунок 8 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС среднеуглеродистой стали KE155 ([C] – 0,30 мас. %; [Mn] – 1,29 мас. %; [Si] – 0,29 мас. %; [Al] – 0,025 мас. %); скорость вытягивания слитка 3,2 м/мин; размер сляба 1580X90,5 мм²

Отмечено увеличение теплового потока в кристаллизаторе по широкой плите на ~7,5 % (увеличение с 1870 до 2010 кВт/м²), когда после условно «грязной стали» (плавка № 2) осуществлена разливка «чистой стали» (плавка № 3). Влияние было выражено по общему кислороду 0,0004 мас. % (снижение с 0,0018 до 0,0014 мас. %) и по связанному алюминию 0,0025 мас. % (снижение с 0,0033 до 0,0009 мас. %). На всех плавках содержание водорода было одинаковым, то есть его влияние в этом случае было не решающим.

Представленные сравнения параметров свойств шлака в кристаллизаторе для различного уровня чистоты стали по оксидам и водороду следует

учитывать при разработке и совершенствованию технологии производства «чистой стали» на этапе её разлива.

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

В действующих сталеплавильных цехах, в случае необходимости производить «чистую сталь», следует обратить внимание на 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 (принятая) 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.

Разработана специальная методика (М.20-63.272.156) прямой оценки загрязнённости неметаллическими включениями стали, отобранной из сталеразливочного или промежуточного ковша, которая устанавливает порядок отбора исследовательских проб металла и описывает процедуру металлографических измерений с определением объёмного содержания и размеров включений. Кроме этого, возможно осуществлять оценку содержания включений в непрерывнолитом металле (в заготовке или слябе). Выполнялись металлографические измерения количества линейных размеров, площади элементов микроструктуры в выбранном сечении в пространстве структуры. Также определялся средний диаметр включений, который усреднялся по всем возможным ориентировкам частиц. Был применен ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений» и ASTM E1245-03 (2016) «Стандартное практическое руководство по определению содержания включений или компонентов вторичной фазы в металлах при помощи автоматического анализа изображений».

Объёмное содержание включений в пробах из сталеразливочного ковша на всем марочном исследуемом сортаменте находится в диапазоне 0,0043 до 0,0230 об. % (среднее значение – 0,0092 об. %), содержание включений в пробах из промежуточного ковша находится в диапазоне от 0,0063 до 0,0210 об. % (среднее значение – 0,0129 об. %). Погрешность определения этих значений для включений размером более 2 мкм (включительно) составила $\pm 0,002$ об. %.

Установлено, что объёмная доля включений в промежуточном ковше в среднем повышается на 40 % или в 2,5 раза. Увеличение включений в про-

межуточном ковше УНРС было рассмотрено в главе 3 при оценке процесса вторичного окисления во время разливки. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) включений показал (рисунок 9-а), что в пробах из сталеразливочного ковша большинство включений являются сложными оксидами (алюминаты кальция и магния) с сульфидами кальция. В пробах из промежуточного ковша (рисунок 9-б) большинство включений содержат те же алюминаты, но более крупных размеров и продукты реакций вторичного окисления, в состав которых входит марганец и кремний.

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 промежуточном ковше УНРС и в целом количество включений размером более 50 мкм выше, чем в сталеразливочном ковше (таблица 4). Было исследовано 37 плавок и 74 пробы металла. Также обнаружены включения продуктов реакций вторичного окисления металла шлаком, в которых присутствует 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). Это подтверждает проблему со вторичным окислением металла в промежуточном ковше.

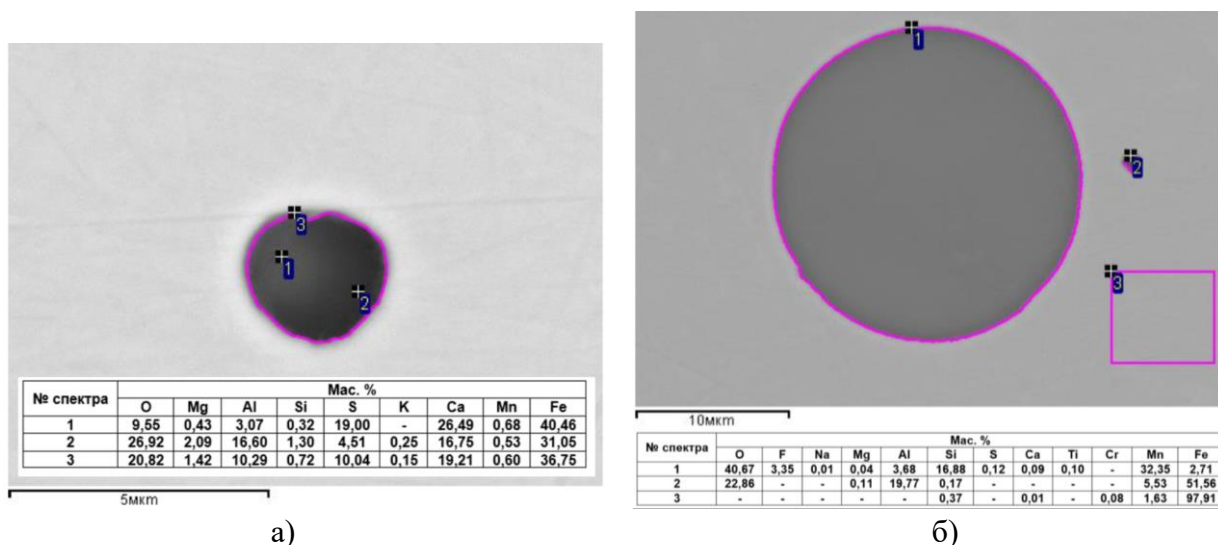


Рисунок 9 – Результат микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в пробе из сталеразливочного (а) и промежуточного ковшей (б)

Данные из таблицы 4 говорят о том, что преобладают включения не макроскопических размеров (более 100 мкм), а преимущественно включения малых размеров (менее 10 мкм), а на втором месте размеров от 10 до 50 мкм. На это следует обращать внимание для того, чтобы можно было оценивать текущую чистоту стали как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах, и в случае проведения мероприятий по снижению в металле неметаллических включений оценивать получаемые результаты.

Таблица 4 – 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

Разработана уточненная классификация высококачественных сталей по содержанию вредных примесей и газов. Новая классификация чистоты стали – это «суперчистая сталь» с суммой всех загрязнений атомов на 1 млн. атомов железа не более 500 или в 3 раз меньше чем в понятии «чистая сталь» по Гуляеву А.П. Предлагается разделить высококачественную сталь по содержанию вредных примесей (концентрация общего кислорода, серы, водорода, азота, фосфора и объёмная доля включений) на две группы.

«Чистая сталь» содержит вредных примесей и газов не более 1500 атомов на 1 млн. атомов железа, без учёта содержания в металле цветных примесей и с объёмной долей включений не более 0,020 об. %. В «чистой стали» следует ограничивать следующее содержание примесей и газов (мас. %): $[O]_{\text{общ}} \leq 0,00500 \%$; $[S] \leq 0,02500 \%$; $[H] \leq 0,00060 \%$; $[N] \leq 0,01000 \%$; $[P] \leq 0,02500 \%$.

«Суперчистая сталь» содержит вредных примесей и газов не более 500 атомов на 1 млн. атомов железа, без учёта содержания в металле цветных примесей и с объёмной долей включений не более 0,015 об. %. В «суперчистой стали» следует ограничивать следующее содержание примесей и газов (мас. %): $[O]_{\text{общ}} \leq 0,00150 \%$; $[S] \leq 0,00150 \%$; $[H] \leq 0,00015 \%$; $[N] \leq 0,00500 \%$; $[P] \leq 0,00800 \%$.

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 (ме-

таллошихта, ферросплавы и раскислители, шлакообразующие, флюсы, углеродосодержащие материалы, огнеупоры и др.).

В шестой главе «Разработка алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» рассмотрены производственные потери из-за неметаллических включений и в том числе, все выявленные элементы производства «чистой стали» в предыдущих главах, которые на прямую отражаются на производительности сталеплавильного цеха и в конечном итоге ухудшают технико-экономические показатели производства.

В результате проведенных работ по совершенствованию технологии производства «чистой стали» 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 соответствующие 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 «чистой стали» был создан перечень из 25 ключевых контролируемых параметров, которые влияют на качество, производительность и себестоимость стали. Эти ключевые параметры охватывают следующие важные технологические блоки производства «чистой стали» от выплавки до разлива: 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.

В результате диссертационного исследования, с применением всех доступных современных инструментов и технологий, были сформулированы следующие дополнительные мероприятия, которые исключают или снижают негативные элементы в технологии производства «чистой стали»:

- необходимо выполнять вакуумирование всей производимой стали с целью снижения растворенного водорода ($[H] < 0,00020$ мас. %);

- применять специальные ШОС для промежуточного ковша, которые исключают или снижают процесс вторичного окисления через шлак ($SiO_2 < 40$ мас. %) и с учётом применяемого огнеупорного рабочего слоя фу-

теровки промежуточного ковша (содержание примеси SiO_2 в торкрет-массе должно быть < 5 мас. %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1,0$ мас. % и в составе огнеупорного материала не должны содержаться оливины $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$) с минимальным износом в шлаковом поясе (не более 3,5 мм/ч). Рекомендуется применять как двухслойную технологию: первый слой, соприкасающийся с жидким металлом через алюминат кальция ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$), химический состав которого схож со шлаком в сталеразливочном ковше, но без сульфида кальция и второй слой – теплоизолятор с пониженным содержанием SiO_2 или однослойная технология с применением универсального ШОС для промежуточного ковша с низкой концентрацией кислых оксидов;

- осуществлять технологию автоматической отсечки ковшевого шлака в комплексе с профилированным дном сталеразливочного ковша в период доливания плавки на УНРС, которая может быть сбалансирована как по качеству (минимальное количество попавшего шлака в промежуточный ковш), так и по производительности (минимальный остаток металла в сталеразливочном ковше).

Алгоритм корректировки технологии производства «чистой 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 ($[\text{O}]_{\text{общ}} < 0,0015$ мас. % и $[\text{S}] < 0,0015$ мас. %), вредных примесей и газов в сталеразливочном ковше, а также ключевое – вся сталь должна проходить вакуумную обработку ($[\text{H}] < 0,00020$ мас. %). Второй этап – решение задачи по получению «чистой стали» в промежуточном ковше ($[\text{O}]_{\text{общ}} < 0,0020$ мас. % и $[\text{H}] < 0,00020$ мас. %).

Блок 2. После получения стабильной чистоты стали в промежуточном ковше выполняется корректировка физико-химических свойств ШОС для кристаллизатора УНРС по вязкости и основности. Ключевой момент корректировки технологии производства «чистой 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.

Для поиска баланса по корректировке и оценке текущей ситуации следует внедрить мониторинг и контроль ключевых технологических параметров (ранее было установлено, что таких параметров должно быть 25), а также следует применять все доступные цифровые технологии: методы автоматизированного управления производством, включая элементы математиче-

ских и термодинамических моделей, а также алгоритмические подходы для построения статистических моделей с применением технологии машинного обучения, больших данных, нейронных сетей. Конкретные рекомендации зависят от производственных условий и набора оборудования.

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 осуществлять аудит технологии на постоянной основе в виде подготовки ежедневных и еженедельных отчётов, в которых следует разбирать и объяснять, как ухудшения, так и улучшения производства «чистой стали». Также в этих отчётах могут быть определены значимые и эффективные мероприятия для последующей их реализации на производстве.

На рисунке 10 представлена схема описанного выше алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству. Предлагаемый алгоритм охватывает все процессы производства «чистой стали», 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 разлива стали. В этом случае содержание и наполнение представленной схемы алгоритма на рисунке 10, 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.

Разработанная технология «чистая сталь» обладает следующими признаками: воспроизводимостью, масштабируемостью, тиражируемостью, обоснованной себестоимостью. Квалификация персонала для исполнения технологии «чистая сталь» не требует особых глубоких знаний так как разработаны простые последовательности выполняемых операций и все технологические элементы максимально учтены; логистика и организация производства строятся от технологии, а не наоборот.

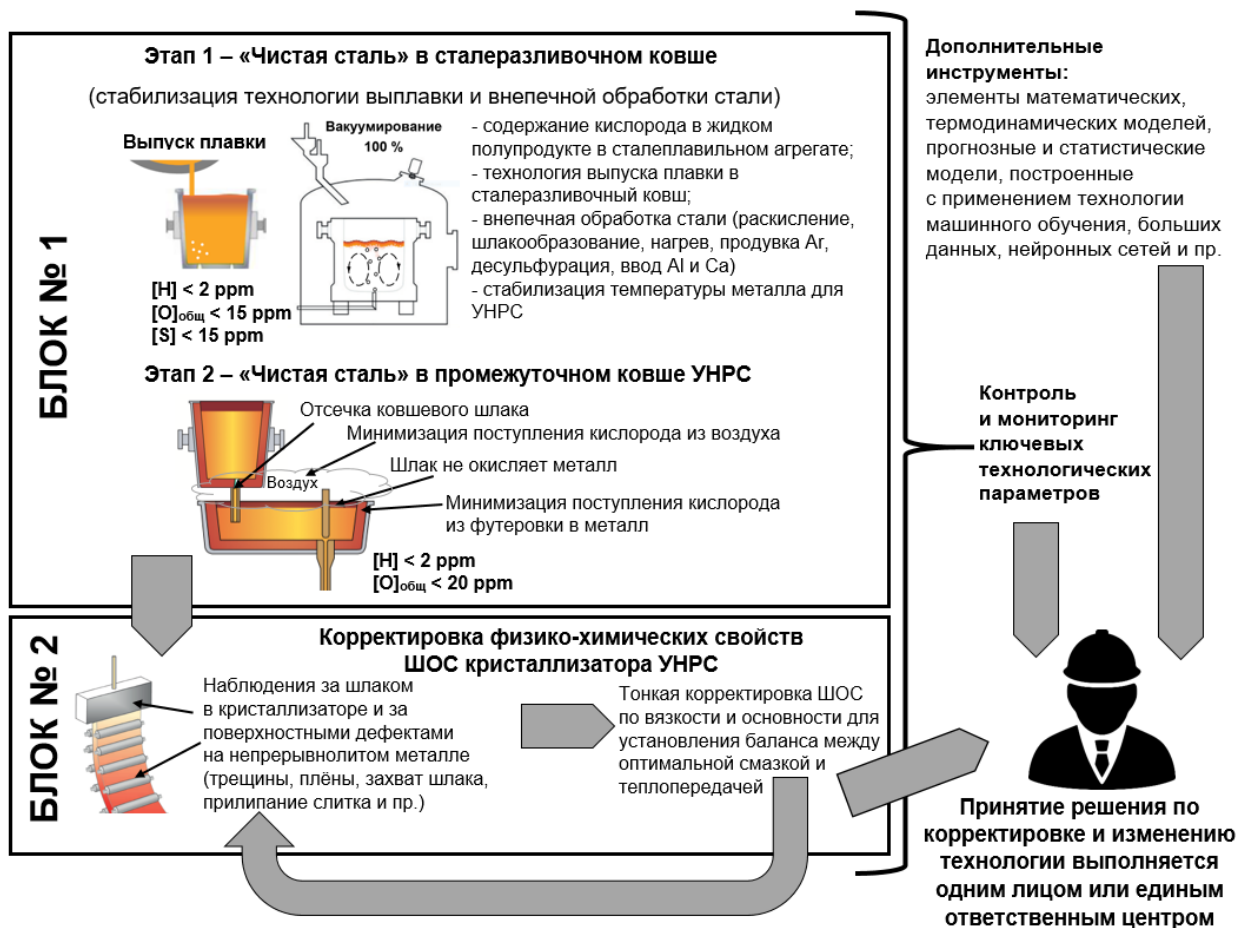


Рисунок 10 – Схема алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству

В приложениях приведены данные для расчёта равновесного состояния в системе «металл-шлак-газовая фаза» для выпуска плавки, результаты количественной оценки фазового состава тугоплавких отложений от различных стаканов УНРС, уточненные выдержки для классификатора дефектов непрерывнолитого металла, письма и акты об использовании результатов работы, патент и перечень контролируемых параметров технологии производства «чистой» и «суперчистой стали».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

Диссертационное исследование, связанное с разработкой 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 дея-

тельности металлургических компаний, производящих высококачественную сталь для машиностроения, энергетики и транспорта.

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 включений, примесей и газов. Рассмотрены современные представления о чистоте стали и приведен обзор ранее опубликованных результатов получения и производства данной стали. Рассмотрено влияние оксидов, сульфидов или их комбинаций на свойства высококачественных сталей; методы снижения содержания этих включений в стали и в сталеплавильном производстве; применяемые технологии на предприятиях для улучшения эксплуатационных свойств металлопродукции.

2. Создан уникальный комплекс интеллектуальных и аппаратных средств (программа 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 созданного комплекса, эффективно работает положение о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак» и контроле вторичных экзопотоков 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. Предложен новый комбинированный подход совершенствования и разработки технологии производства «чистой стали» с применением принципов термодинамики в программе STM и математической модели прогнозирования температуры в промежуточном УНРС.

4. Разработана классификация дефектов, возникающих при производстве «чистой стали» по следующим признакам: природа образования (сталеплавильная или прокатная), месторасположение на металлопрокате, химический состав включений, наличие обезуглероженного слоя в самом дефекте или около него. На основании исследований и изучения природы дефектов металла предложено разделять дефект «плена» на три типа: 1 – плена

из-за неметаллических включений; 2 – плена из-за трещин на поверхности непрерывнолитого металла; 3 – плена, формирующаяся в процессе деформации. Добавлена новая информация о факторах и технологических параметрах, влияющих на образование и развитие дефектов, а также их трансформацию в процессе прокатки и предлагаемые способы предупреждения.

5. Выполненный анализ комплекса мероприятий производства высококачественных сталей от выплавки до разливки позволил применить комплексный подход разработки технологии «чистой 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.

6. Разработаны и внедрены эффективные мероприятия, снижающие случаи «смывов» тугоплавких неметаллических включений с разливочного стакана промежуточного ковша. Установлено и научно обосновано предельное содержание вредных элементов в стали, раскисленной алюминием: общего кислорода – не более 0,0020 мас. %, серы – не более 0,0030 мас. %, оксида алюминия – не более 0,0020 мас. % и оксида кальция – не более 0,0025 мас. %, превышение которых приводит к значительному снижению механических свойств и качества готовой металлопродукции за счёт формирования избыточного количества неметаллических включений.

7. Определена степень влияния физико-химических свойств огнеупорного материала промежуточного ковша на процесс общего вторичного окисления расплава при производстве высококачественной стали раскисленной алюминием, которая составляет менее 10 % и в среднем около 5 % от общей степени влияния других процессов поступления кислорода в расплав из атмосферы воздуха и шлака.

8. Разработан и внедрен комплекс технологических мероприятий производства «чистой стали» на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла. Показан механизм формирования продольных дефектов на непрерывнолитом металле при определенных физико-химических свойствах и структуре шлака в кристаллизаторе в процессе разливки «чистой стали» на УНРС. Технологические особенности свойства шлака в кристаллизаторе для разливки «чистой стали» состоят в том, что необходимо учесть множество факторов с целью производства стали без дефектов и технологичности производства, которые могут быть как для «чистой стали» в виде продольных дефектов, так и для стали с повышенным содержанием включений – поперечных трещин, плён в прокате и прорывов

на УНРС. Установлены дополнительные значимые технологические параметры производства «чистой стали», которые могут значительно менять содержание неметаллических включений в металле и его качество – вязкость и основность шлакообразующей смеси (ШОС) для кристаллизатора УНРС.

9. Опытным путём было установлено, что влияние ШОС на теплопередачу от металла к кристаллизатору может составлять от 6 до 15 %, 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.

10. Разработан алгоритм подбора ШОС кристаллизатора для разливки «чистой стали», который заключается в стабилизации процесса выплавки и внепечной обработки стали по получению низкого содержания оксидов в сталеразливочном и промежуточном ковшах, далее выполняется выбор оптимального ШОС по физико-химическим свойствам: плавление смеси и проникновение шлака в зазор слиток-кристаллизатор.

11. Предложена новая интерпретация классификации чистоты стали в соответствии с современными представлениями и тенденциями по содержанию в ней общего кислорода, серы, фосфора, азота, водорода и объёмной доли включений, а также введено новое понятие – «суперчистая сталь», которое было запатентовано автором диссертации. 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 материалов, применяемых в производстве стали.

12. Разработана и предложена металлографическая методика оценки включений в сталеразливочном и промежуточном ковшах для осуществления сравнения объёмной доли и размера включений, которая дополняет оценку чистоты стали по содержанию в ней включений, вредных примесей и газов.

13. Предложен новый метод мониторинга и контроля технологии производства «чистой стали», заключающийся в создании уникального комплекса интеллектуальных и аппаратных средств, позволяющий быстро разрабатывать инновационные технологии получения «чистой стали» 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.

14. Разработан алгоритм корректировки технологии производства «чистой стали» 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 «чистой» и «суперчистой стали», раскисленной алюминием, 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.

15. Предложен подход к организации промышленного производства, охватывающий все переделы получения высококачественной стали, который позволяет внедрить единую систему автоматизированного управления производством, позволяющую решать задачи оптимального управления по таким показателям как себестоимость, темп производства и качество получаемой стали.

16. Разработана сквозная технология на базе комплекса предложенных мероприятий производства «чистой стали». Установлены важные технологические блоки производства «чистой стали», от выплавки до разливки стали и с внедрением мониторинга и контроля 25 ключевых технологических параметров, которые позволяют поднять общий уровень технологии до показателей лучших мировых практик за счёт оптимального пути совершенствования технологии (организационный или инвестиционный).

17. Внедрение разработанной технологии производства «чистой стали» на других отечественных предприятиях может привести к снижению удельных суммарных затрат от 2 до 5 долл. США на 1 тонну непрерывнолитого металла в зависимости от исходных условий на соответствующем производстве.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК Минобрнауки России

1. Чикалов, С.Г. Современный электросталеплавильный комплекс по производству качественной трубной непрерывнолитой заготовки / С.Г. Чикалов, В.И. Тазетдинов, А.Г. Ряполов, С.А. Ботников, С.В. Соломин // Электрометаллургия. – 2010. – № 2. – С. 23-26.

2. **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.

3. 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.

4. 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.

5. **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.

6. **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.

7. 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.

8. 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 // Чёрные металлы. – 2018. – № 9. – С. 34-39.

9. 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 // Чёрные металлы. – 2018. – № 11. – С. 53-57.

10. **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.

11. **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.

12. 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 // Чёрные металлы. – 2021. – № 1. – С. 11-16.

Публикации, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

1. Chikalov, S.G. Modern electric furnace plant for the production of a high-quality tube continuous billet / S.G. Chikalov, V.I. Tazetdinov, A.G. Ryapolov, **S.A. Botnikov**, S.V. Solomin // Russian Metallurgy (Metally). – 2010. – Vol. 2010, № 12. – P. 1107-1109. DOI:10.1134/S0036029510120050.

2. Ryapolov, A.G. Russian electrosmelting and predicted demand for metal scrap / A.G. Ryapolov, **S.A. Botnikov** // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44, № 1. – P. 47-49. DOI:10.3103/S0967091214010148.

3. **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.

4. 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.

5. 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.

6. **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.

7. **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.

8. 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.

9. **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.

10. **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.

11. 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.

Монография

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

Патент

Ботников, С.А., Моров, Д.В. Способ получения суперчистой стали, раскисленной алюминием, для производства высококачественной металло-

продукции. // Патент Российской Федерации на изобретение № 2740949 от 21.01.2021 г.

Публикации в других изданиях

1. **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.

2. 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.

3. 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.

4. **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.

5. **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.

6. 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.

7. 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.

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

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

10. 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 сталепла-
вильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 414-418.

11. 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 XIV между-
народного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь,
2016. – С. 490-493.

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

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

14. Моров, Д.В. Методы оценки процессов вторичного окисления ме-
талла 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.

15. Моров, Д.В. Влияния геометрии сталевого 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.

16. 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 сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 283-287.

17. **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.

18. **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 Междунаро-
дной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация
сталеплавильщиков», 2020. – С. 100-111.

19. **Ботников, С.А.** Базовые элементы технологии производства «чи-
стой стали» в современном электрометаллургическом комплексе / С.А. Бо-
тников // Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Международной
конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация стале-
плавильщиков», 2020. – С. 174-179.