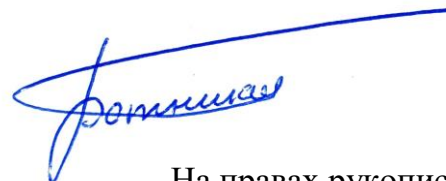


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(национальный исследовательский университет)»



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»

Диссертация

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
Заслуженный деятель науки РФ
д.т.н., профессор
Михайлов Геннадий Георгиевич

Челябинск – 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ С НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ВКЛЮЧЕНИЙ, ПРИМЕСЕЙ И ГАЗОВ.....	20
1.1 Требования к качеству стали по содержанию неметаллических включений, примесей и газов	21
1.2 Понятие о производстве «чистой стали» по содержанию оксидных и сульфидных неметаллических включений.....	38
1.3 Повышенные требования к современному производству стали и поиск баланса в производственной системе: себестоимость-производительность-качество	46
1.4 Проблемы производства «чистой стали» в современных сталеплавильных цехах	51
Выводы по главе 1	70
ГЛАВА 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА «ЧИСТОЙ СТАЛИ».....	74
2.1 Обзор вычислительной термодинамики.....	74
2.2 Термодинамический модуль программного комплекса SyTherMa.....	91
2.3 Методы углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных».....	94
2.4 Пример разработки модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах методами машинного обучения	100
Выводы по главе 2	115
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СТАЛИ	119

3.1 Разработка технологии выпуска жидкого полупродукта в сталеразливочный ковш и дальнейшая внепечная обработка стали	119
3.2 Разработка технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС	135
3.3 Разработка технологии разливки «чистой стали» на УНРС	148
3.4 Пути повышения уровня технологии по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей	170
3.5 Выбор параметров разделения природы образования металлургических дефектов.....	177
3.6 Поиск и подтверждение значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов из-за неметаллических включений с применением метода углубленной аналитики и машинного обучения	187
Выводы по главе 3	202
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В МЕТАЛЛЕ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ, ВКЛЮЧЕНИЙ И ГАЗОВ НА СВОЙСТВА ШОС В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ	207
4.1 Технологические особенности свойства шлака в кристаллизаторе для разливки «чистой стали»	207
4.2 Влияние содержания водорода и оксидов в металле на изменение параметров теплопередачи через шлак в кристаллизаторе	224
4.3 Сравнения параметров свойств шлака в кристаллизаторе для различного уровня чистоты стали по оксидам и газам.....	226
4.4 Разработка алгоритма подбора шлакообразующей смеси кристаллизатора для разливки «чистой стали» на УНРС.....	236
Выводы по главе 4	238
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ ЧИСТОТЫ СТАЛИ	240
5.1 Влияние содержания в металле общего кислорода, азота, водорода, серы, фосфора на чистоту стали и качество металлопродукции	240

5.2 Разработка дифференцированного подхода к требованиям технологии производства «чистой стали» и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства	243
5.3 Оценка чистоты металла прямыми методами исследований	255
5.4 Разработка классификации высококачественных сталей по содержанию вредных примесей и газов	262
Выводы по главе 5	267
ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОРРЕКТИРОВКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА «ЧИСТОЙ СТАЛИ»	269
6.1 Производственные потери из-за неметаллических включений	269
6.2 Создание нового метода мониторинга и контроля производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве	270
6.3 Комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали с низким содержанием неметаллических включений	278
6.4 Разработка и внедрение алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству	283
Выводы по главе 6	293
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	296
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	302
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	335
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Фактические данные для расчёта равновесного состояния в системе «металл-шлак-газовая фаза» для выпуска плавки	335
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты количественной оценки фазового состава тугоплавких отложений от разливочных стаканов УНРС после серийной разливки плавов и фрагменты дифрактограмм с результатами расшифровки	337

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Обновлённая информация для классификатора дефектов непрерывнолитого металла, связанных на прямую или косвенно с содержанием в металле неметаллических включений.....	342
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Письма и акты об использовании результатов диссертационной работы.....	357
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Изобретение к патенту №2740949.....	361
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Перечень контролируемых параметров технологии производства «чистой стали» и «суперчистой стали»	362

ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Впервые термин «чистая сталь» был предложен Гуляевым А. П. в 1975 году. Данная сталь содержит сумму атомов серы, фосфора, кислорода, азота и водорода ($S, P, [O]_{\text{общ}}, N$ 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 не-

металлических 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.**

Цель и задачи диссертационной работы

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.

7. Предложена новая интерпретация классификации чистоты стали в соответ-

ствии 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 внедрен 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: построение гистограмм распределения, определение уравнения линии тренда методом наименьших квадратов и вероятностно-графические модели. Методы продвинутого (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» и АО «Первоуральский новотрубный завод».

Тематика работы. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам области исследования Паспорта специальности ВАК РФ «05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов»:

- п. 2. Твёрдое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных систем;
- п. 4. Термодинамика и кинетика металлургических процессов;
- п. 5. Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов;
- п. 8. Кристаллизация расплавов;
- п. 11. Пирометаллургические процессы и агрегаты;
- п. 12. Электрометаллургические процессы и агрегаты;
- п. 15. Внепечная обработка металлов;
- п. 16. Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки;
- п. 19. Производство особо чистых металлов и сплавов;

п. 20. Математические модели процессов производства черных, цветных и редких металлов.

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 экзоптоков кислорода в расплавах 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. Показа-

зано, 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 действующих 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 (сталеплавильная 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 непрерывнолитом 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 производством, 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 диссертаци-

онного 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 непрерывнолитого металла в зависимости от исходных условий на соответствующем производстве.

Реализация результатов работы

Разработана техническая документация сквозной технологии производства «чистой стали», в соответствии с которой осуществляется производство трубной стали на металлургических заводах: АО «Выксунский металлургический завод» и АО «Первоуральский новотрубный завод».

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 эксперимен-

тальных и промышленных плавок; достаточным объёмом теоретических, производственных и опытных данных; металлографическими исследованиями природы дефектов, связанных с неметаллическими включениями; количественной оценки фазового состава неметаллических включений в пробах металла и в виде отложений от разливочных стаканов УНРС; адекватностью термодинамических и математических моделей, проверенных путём сопоставления расчётных данных с результатами промышленных испытаний, а также с данными литературных источников. Полученные результаты коррелируют с ранее опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами и не противоречат современным теоретическим представлениям.

На защиту выносятся следующие положения.

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

2. 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 разлива 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 разлива 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 печатные работы, 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.

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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ С НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ВКЛЮЧЕНИЙ, ПРИМЕСЕЙ И ГАЗОВ

В аналитическом обзоре литературы рассмотрено влияние оксидов и сульфидов или их комбинаций на свойства высококачественных марок сталей; методы снижения содержания этих включений в стали и в сталеплавильном производстве, применяемые технологии на отечественных и зарубежных предприятиях для минимизации отрицательных их свойств металла.

До сих пор считается, что изучение неметаллических включений различными методами исследований актуальна и востребована для продолжения современных разработок в металлургии и совершенствования технологии производства высококачественной стали. Первая большая работа Бенедикса и Лефквиста была для металлургов наиболее полным руководством по изучению неметаллических включений [1]. По мере совершенствования технологии и внедрения новых методов производства стали эта тема продолжает развиваться. Данная проблема и задача тесно связаны с технологией раскисления и она является актуальной у сталеплавильщиков. Например, можно отметить, что вопросы комплексного раскисления стали поверхностно излагаются в учебной литературе и недостаточно полно в научной литературе, по сравнению с вопросом раскисления стали отдельными раскислителями. Совершенствование процесса раскисления на основе состава комплексных раскислителей для рафинирования стали от кислорода и сознательное управление химическими и фазовым составом неметаллических включений с учётом порядка ввода в металл раскислителей и ферросплавов возможны на основе термодинамического анализа процессов комплексного раскисления. Единой и структурированной информации по данной теме не существует из-за постоянных новых открытий и достижений в металлургии в данном направлении. Кроме технологии раскисления есть ряд и других технологических решений, которые направлены на снижение в металле включений и газов, например, вакуумирование расплава, применение особо чистых и качественных материалов, ужесточение

ведения технологического процесса в сталеплавильном производстве и многое другое.

1.1 Требования к качеству стали по содержанию неметаллических включений, примесей и газов

В представленной работе рассматривается металл раскисленный алюминием и в технологии применяется основной процесс. Кислый процесс и раскисление металла кремнием и марганцем приводится в качестве сравнения и показывает существенную разницу при формировании научных основ сквозной технологии получения «чистой стали» раскисленной алюминием. В случае осуществления раскисления металла алюминием, кислые процессы вредны и нежелательны для обеспечения чистоты стали по оксидным включениям, в частности оксида алюминия (Al_2O_3).

Чтобы снизить концентрацию кислорода в металле, на завершающих стадиях плавки или при рафинировании на внепечных установках обработки стали проводят его раскисление – искусственное снижение концентрации кислорода в жидком металле до необходимого уровня [135]. Обычно раскисление проводят введением в жидкий металл (во время выпуска плавки в ковш или ковш после выпуска плавки) веществ, снижающих растворенный кислород. К таким веществам относятся в металлургии прежде всего марганец, кремний, алюминий и кальций. При раскислении образуются неметаллические включения – оксидные соединения, которые в значительной степени удаляются (всплывают из-за существенно меньшей плотности) из жидкого металла еще до его кристаллизации.

Технология раскисления стали во многом определяет её качество, эксплуатационные характеристики, зависящие не только от остаточной концентрации кислорода, но и от природы, количества, размеров и характера распределения в металлической матрице неметаллических включений [135]. Проблема оксидных неметаллических включений и рациональной организации процесса раскисления стали остается по-прежнему одной из важных в металлургии.

По классификации, предложенной В.И. Явойским [11], в металле выделяют: первичные неметаллические включения (формируются в жидком металле при высоких температурах); вторичные неметаллические включения (образуются при охлаждении металла до температуры ликвидус); третичные неметаллические включения (формируются при кристаллизации в интервале температур ликвидус и солидус); четвертичные неметаллические включения (образуются при охлаждении твёрдого металла). Помимо этого, возможна трансформация любых включений, связанная во взаимодействии их с компонентами металла при нагреве слитков под прокатку и при термообработке металла.

Термодинамический анализ раскисления сталей состоит в расчёте равновесий процессов взаимодействия растворенного в металле кислорода с раскислителем с целью определения следующих параметров [135]:

- природы и состава продуктов раскисления (неметаллических жидких и твёрдых включений или газовых смесей);
- остаточных концентраций кислорода и раскислителя в стали;
- равновесного давления кислорода;
- рационального состава раскисляющих сплавов.

Для такого расчёта необходимо знать константы равновесия реакций раскисления и зависимости их от температуры, иметь информацию об активностях компонентов металлических и оксидных фаз, а также о зависимостях их от состава соответствующих фаз.

Известно, что алюминий и титан существенно повышают вязкость жидкой стали [10]. В соответствии с уравнением Стокса, скорость всплывания включений обратно пропорционально динамической вязкости жидкой стали. Бытовало мнение, что в жидкой стали, содержащей алюминий и титан, эффективность всплывания и отделения включений заметно снижается и получить «чистую сталь» считается проблематичным.

Процесс удаления мелких включений (около 5 мкм) более медленный. Долгое время считали, что включения Al_2O_3 всплывают в 4-8 раз медленнее, чем равные по размерам включения силикатов. Это связывали с неправильной формой

Al_2O_3 , а также изменением ориентации включений глинозёма во время всплывания и их плотностью, а также коэффициентом смачиваемости.

В свое время также считали, что порядок раскисления жидкой стали должен быть таким, чтобы первоначально обеспечить получение жидких неметаллических включений, применяя предварительное раскисление стали марганцем и кремнием с добавками малого количества алюминия. При этом исходили из того, что преобладающая часть включений удаляется по закону Стокса, согласно которому скорость удаления пропорциональна квадрату радиуса, следовательно, необходимо добиваться формирования включений, способных к быстрому укрупнению и удалению. Этим требованиям соответствуют жидкие продукты раскисления: они легко «укрупняются», в результате чего увеличиваются размеры частиц и быстро всплывают из-за разности плотностей металла и включений; хорошо ассимилируют твёрдые включения (типа Al_2O_3), которые образуются на второй стадии раскисления при введении сильных раскислителей [21, 38].

Последующие исследования [5, 6] поверхностных свойств на межфазных границах металла – неметаллические включения – шлак – газовая фаза показали, что особенности удаления продуктов раскисления связаны главным образом не с размером, а с типом включений. Было установлено, что продукты раскисления сильными раскислителями (Al_2O_3) удаляются из жидкой стали быстрее, чем силикаты. Быстрое удаление включений корунда объясняется высоким межфазным натяжением (2000 мДж/м^2) и явлением скольжения. Также было показано, что силикаты, характеризующиеся хорошей смачиваемостью и меньшим значением межфазного натяжения (в три раза меньше: $600\text{--}800 \text{ мДж/м}^2$), при тех же самых размерах удаляются значительно медленнее.

Процесс и способ раскисления прежде всего определяют свойства готового металла, например, трубы, колеса, рессоры и др. Основные методы раскисления: глубинное (осаждающее), диффузионное и обработка стали вакуумом.

К основным раскислителям в современном сталеплавильном производстве относят:

- марганец металлический или ферромарганец с низким или высоким содержанием углерода (ведущий химический элемент Mn-марганец);
- ферросилиций FeSi с низким или высоким содержанием углерода (ведущий химический элемент Si-кремний);
- алюминий первичный и вторичный с концентрацией Al от 95 до 99 мас. %;
- углеродосодержащие материалы (C-углерод);
- комплексные раскислители (различные сплавы: Si-Mn, Al-Si-Mn, C-Si-Mn, C-Al-Si-Mn, CaC₂-Al и другие комбинации).

Преимущество комплексного раскисления – обычно это меньшее содержание растворенного кислорода по сравнению с раскислением только одним элементом. Под комплексным раскислением обычно понимают раскисление стали сложным по составу сплавом, например, силикомарганцем, силикокальцием, сплавом АМС (алюминий, марганец, кремний) или другим многокомпонентным сплавом [135]. Практика раскисления показывает, что скорость процесса, глубина раскисления, состав неметаллических включений, скорость их удаления зависят от последовательности ввода раскислителей и легирующих компонентов и соотношения их концентраций в комплексных сплавах для раскисления. А.Ф. Вишкарев определяет задачи комплексного раскисления следующим образом [30]: «Комплексное раскисление ставит своей целью минимизировать содержание кислорода в металле для повышения чистоты стали от неметаллических включений, повысить эффективность использования одного из компонентов комплексного сплава за счёт его защиты другими компонентами, изменить термовременную природу неметаллических включений, их морфологию с целью облегчения удаления неметаллических включений из металла и уменьшения вредного влияния на свойства готовой продукции». Следует также учитывать, что легированные стали имеют сложный состав. При их производстве, даже если сталь раскисляется алюминием, легирующие добавки также могут принять участие в раскислении. Поэтому при раскислении сложнолегированных сталей всегда будут реализовываться схемы комплексного раскисления [135].

В настоящее время в металлургии распространено три вида раскисления по степени раскисленности стали в атмосфере [57]:

1. Сталь раскисленная марганцем до достижения уровня растворенного кислорода 0,0100-0,0200 мас. % (кипящая сталь);

2. Полуспокойная сталь с содержанием растворённого кислорода 0,0020-0,0070 мас. % (рядовые марки стали, арматурная сталь и др.).

Данную сталь раскисляют следующими элементами:

- Si / Mn - содержание растворенного кислорода 0,005-0,007 мас. %;

- Si / Mn / Al в небольших количествах – содержание растворенного кислорода 0,0025-0,0040 мас. %;

- Si / Mn / Ca - содержание растворенного кислорода 0,0015-0,0020 мас. %;

3. Спокойная сталь раскисляется в основном за счёт применения алюминия для достижения растворенного кислорода в расплаве до уровня от 0,0002 до 0,0004 мас. %.

Спокойная сталь может быть самой чистой по содержанию в ней общего кислорода. В настоящее время в связи с развитием методов внепечной обработки стали и успешной реализацией процессов непрерывной разливки производство кипящей и полуспокойной сталей стала анахронизмом [135]. Поэтому в разрезе получения «чистой стали» актуально рассматривать спокойную сталь раскисленную алюминием.

Общие закономерности загрязнения металла базируются на том, что металл загрязняется сталеплавильным шлаком, продуктами эрозии футеровки, продуктами раскисления стали в ковше и в процессе затвердевания, а также в процессе вторичного окисления [121]. Одновременно с этим происходит процесс рафинирования стали от включений за счёт всплывания и выноса конвективными потоками металла включений к зеркалу и его ассимиляции шлаком. От того, какие процессы будут превалировать зависит конечная чистота стали по неметаллическим включениям [32].

В представленных работах [17, 26] было рассмотрено, что снижение расхода алюминия с 1,5 до 0,3 кг/т для раскисления углеродистой и низколегированной

стали приводило к повышению включений в 1,5 раза, а также уход от глинозёмистых (основа – Al_2O_3 и 3-8 мас. % FeO) к марганцевосиликатным включениям (20 мас. % Al_2O_3 , 20 мас. % SiO_2 , 35 мас. % MnO). Дополнительный плюс от глубокого раскисления металла алюминием – это уменьшение ликвации сульфидных и оксидных включений в осевой зоне заготовок. Однако с увеличением глубины раскисления алюминием возросла роль защиты металла от вторичного окисления с целью исключить крупные кластерные неметаллические включения (размером 80-400 мкм). Мероприятия по защите струи металла от вторичного окисления, на всём пути от промежуточного ковша до кристаллизатора, с применением шлаковых защитных смесей позволило снизить пораженность заготовок крупными кластерными включениями (более 80 мкм) почти в 20 раз.

Отмечается, что не все ресурсы и возможности используются на современном сталеплавильном и разливочном оборудовании для снижения содержания в металле неметаллических включений. В частности, это организационные вопросы и задачи по корректировке и исполнению технологии именно с точки зрения её организации. Многие авторы работ [82, 116, 214, 257] ссылаются на низкий уровень исполнительной дисциплины (низкая культура производства стали) или грубые нарушения технологии раскисления, разливки и др. Зачастую данная трактовка может быть не всегда корректной, так как не в полной мере раскрыты глубинные причины данных нарушений, их первопричины. Причиной может быть, как сама разработанная и принятая на производстве технология, так и используемые материалы в производстве и допускаемые ошибки в организации производства и другие причины, которые могут быть и решающими.

Допускаемая загрязненность неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок определяется их назначением и особенностями передела. Например, в зависимости от назначения металлопродукции требования по содержанию неметаллических включений могут отличаться значительно [105, 121]. Критический размер включений и содержание примесей в высококачественных сталях представлено в таблице 1.1.

Пределные уровни этих примесей, газов и включений достигаются в промышленном производстве за счёт комбинации различных технологических процессов внепечной обработки стали. Требование к содержанию примесей в высококачественных сталях становится все более строгим. Меры для удовлетворения требований были промышленно развиты, но необходимы дополнительные усилия, чтобы сделать их более эффективными и экономичными.

Таблица 1.1 – Типичные требования к чистоте стали, оговариваемы в зависимости от применения металлопродукции

Группы марок сталей и их применение	Допустимое содержание примесей, ppm	Качество поверхности и максимальный (критический) размер включений, мкм	Ключевое свойство для применения
Автолист и лист для глубокой вытяжки. IF-сталь. Сверх глубокая вытяжка	$[C] \leq 20$, $[N] \leq 30$, содержание P, S, H, O и оксидов должно быть минимизировано	–	Среднее значение коэффициента Ланкфорда (степень вытяжки) $r > 2.0$
Цельнотянутые консервные банки. Сталь глубокой вытяжки	$[C] \leq 30$, $[N] \leq 40$, $[O]_{\text{общ}} \leq 20$	< 40	Отсутствие трещин при формовке изделия
Трубные стали	$[S] < 5$ или < 30 $[N] \leq 50$ $[O]_{\text{общ}} \leq 30$	Высокое качество поверхности металлопроката обеспечено малым размером и низкой концентрацией включений	ХИК – стойкость к водородному растрескиванию
Шарикоподшипниковая сталь и изделия для производства подшипников качения	$[Ti] \leq 15$, $[O]_{\text{общ}} \leq 10$	< 10	Устойчивость к контактной усталости при качении
Корд для автошин и каната	$[H] \leq 2$, $[N] \leq 40$, $[O]_{\text{общ}} \leq 15$, $[Al] < 10$	Контроль поверхности, < 10	Устойчивость к разрыву
Толстый лист	$[H] \leq 2$, $[N] \leq 40$, $[O]_{\text{общ}} \leq 20$	< 20	Механические свойства
Теневая решетка (производства кинескопов)	Низкое содержание S	< 5	Четкость изображения
Пружинная проволока	$[Al] < 10$	Контроль поверхности, < 20	Высокое сопротивление упругим деформациям и низкий коэффициент остаточного растяжения
Выводные рамки для микроэлектроники	–	< 5	–
Листовая сталь для транспортировки сжиженного природного газа	$[P] < 30$, $[S] < 10$	–	Устойчивость к межзёрненной хрупкости
Закаленная сталь для машиностроения и энергетики	$[O] < 15$, $[Ti] < 50$	< 15	Устойчивость к износу и усталости

Общие принципы получения стали с низкой концентрацией оксидных неметаллических включений представлены в работе [105]. Выдвинуто следующее, с целью уменьшения количества оксидных включений необходимо использовать инертную атмосферу, а также шлак и огнеупоры должны иметь низкий кислородный потенциал с достаточно хорошим перемешиванием расплава со шлаком. Типичными процессами для этой цели являются установка ковш-печь и вакууматор. Взвешенные мелкие частицы Al_2O_3 имеют тенденцию сталкиваться и агломерировать с образованием крупных кластерных включений Al_2O_3 во время переноса жидкой стали из сталеразливочного ковша в кристаллизатор, даже когда содержание кислорода очень малое. Например, 1 ppm (0,0001 мас. %) кислорода содержащего в частицах алюминия диаметром 2 мкм – это равняется 10^6 частиц/см³ расплава [105].

Авторы работы [154] представляют общие закономерности пораженности неметаллическими включениями макроструктуры непрерывнолитых заготовок, которые базируются на том, что металл загрязняется шлаком сталеразливочного и промежуточного ковшей, продуктами раскисления расплава и разрушения футеровки, а также в результате вторичного окисления высокоактивных элементов (в основном это – алюминий, титан и бор).

Так же авторы работы [154] предлагают разделять неметаллические включения на размеры. Включения условно разделяют на макро- и микро-, если они больше или меньше 1 мм соответственно. К эндогенным относят продукты взаимодействия высокоактивных элементов (Al и Ti) с кислородом и азотом, находящихся в жидкой стали или в воздухе. Сера в жидкой стали взаимодействует с железом или марганцем и кальцием, образуя сульфиды. Этот вид включений, как правило, имеет размеры до 20 мкм. Титан образует нитридные или оксидные включения раньше, чем это формирует алюминий. К экзогенным относят включения, которые попадают в металл из шлака и в результате износа огнеупоров. Кроме этого автор работы [32] принял, что в процессе вторичного окисления сначала появляются окислы железа, которые затем восстанавливаются более активными элементами, например, алюминием, до Al_2O_3 . В результате включения, образуя-

щие из-за вторичного окисления, принято считать экзогенными, потому что они формируются уже в процессе разливки и имеют относительно крупные размеры.

Согласно работы [256] источниками поступления неметаллических включений в сталь в процессе её производства могут быть:

- эндогенные неметаллические включения образуются в результате реакций между растворенными компонентами (небольшой размер включений, чаще всего менее 40 мкм, но могут достигать и больших размеров): это продукты раскисления стали (оксиды) и сульфиды (MnS и CaS);

- экзогенные неметаллические включения, попавшие в расплав извне (большой размер включений, 40-100 мкм и более): вторичное окисление, захват шлака, износ или разрушение огнеупоров;

- экзо-эндогенные неметаллические включения, когда присутствует два вида источника поступления в металл в процессе производства стали или, когда экзогенное включение, так или иначе, видоизменилось при попадании в расплав.

По мнению автора монографии [32], для повышения чистоты непрерывнолитых заготовок по неметаллическим включениям нержавеющей сталей необходимо: ограничивать содержание титана минимально допустимыми значениями; изолировать жидкий металл от воздуха на всех участках от сталеразливочного ковша до кристаллизатора; предотвращать появление плавающей корочки на зеркале металла в кристаллизаторе.

Загрязненность непрерывнолитых заготовок экзогенными включениями зависит от химического состава разливаемой стали, её физико-химического взаимодействия к огнеупорам и их качества, дизайна промежуточных ковшей, способов подвода и защиты металла, составов ковшевых и защитных шлаков. По склонности к вторичному окислению и образованию оксидных включений высокоактивные элементы располагаются в порядке убывания их свободной энергии: Al, Ti, Si, Cr, Mn, Fe. Сталь, содержащая алюминий и титан имеет склонность к вторичному окислению в процессе разливки. Механизмы вторичного окисления алюминия и титана существенно отличаются. Контакт жидкого расплава, содержащий алюминий с воздухом приводит к появлению плотной пленки окиси алюминий

на поверхности расплава, которая затрудняет проникновение в металл кислорода и азота и замедляет процесс дальнейшего взаимодействия. Титан не образует плотной окисной пленки на поверхности металла. Поэтому процесс вторичного окисления захватывает более глубокие слои металла. Оксиды и нитриды титана вместе с входящими в их состав карбидами титана образуют скопления включений в виде губки. Заворот в тело слитка этой губки, заполненной металлом, приводит к дефекту – титанистой пористости. Обычно данный дефект глубоко залегает в металле. С этим связаны сложности отливки заготовок из нержавеющей сталей, легированные титаном (более 0,3 мас. %).

Содержание в стали титана может формировать дефект – титановая неоднородность. Титановая неоднородность согласно справочника [34] – это местные скопления включений оксидов, сульфидов и нитридов титана; встречается в сталях и сплавах легированных титаном. Скопления включений могут быть разбросаны по сечению металла, в этом случае дефект называют общей титановой неоднородностью. При расположении скоплений включений у поверхности слитка дефект называют краевой титановой неоднородностью. Для предупреждения образования титановой неоднородности рекомендуется минимизировать вторичное окисление стали за счёт уменьшения контакта жидкого металла с воздухом и применять разливку стали в атмосфере аргона.

Негативные моменты процессов вторичного окисления также отмечаются на производстве [12]: на стали 08Ю (Al – 0,02-0,07 мас. % и кремния не более 0,03 мас. %) из-за сильного вторичного окисления во время разливки на УНРС приводило к дефектам и далее эти дефекты были трансформированы в холоднокатаных листах. Применение в качестве ШОС в кристаллизаторе экзотермической смеси приводило к сильнейшему вторичному окислению расплава, что по итогу для получения высококачественных холоднокатаных листов требовалась сплошная огневая зачистка литого металла на глубину 5 мм. Кроме того, при использовании экзосмеси протекала нежелательная реакция между кислоторастворимым алюминием в стали и кремнеземом шлака, приводящая к увеличению содержания кремния и повышения оксидов алюминия. Дополнительно формировался в кри-

сталлизаторе грубый гарнисаж, который приводил к аварийным прорывам металла под кристаллизатором.

С целью обеспечения минимальной загрязненности непрерывнолитых заготовок из стали, содержащих высокоактивные элементы, требуется полная изоляция металла от воздуха на всём пути от сталеразливочного ковша до кристаллизатора, ассимиляция всех всплывающих включений в промежуточном ковше и кристаллизаторе, а также исключение возможности затягивания в кристаллизатор включений (шлака) из промежуточного ковша.

Стали, легированные алюминием, кремнием и хромом, имеют прочную и плотную пленку на поверхности расплава. Они менее склонны к вторичному окислению в процессе разливки, чем стали, легированные титаном, которые не образуют подобной защитной пленки.

С увеличением турбулентности создаются более благоприятные условия для диффузии кислорода в металл (в струях и на зеркале), так как снижается монолитность защитной пленки. Турбулентность металла зависит от организации потоков и от вязкости. Стали, легированные алюминием и кремнием, более вязки, чем легированные титаном; высокоуглеродистые стали типа ШХ15 более жидкотекучи, чем низкоуглеродистые.

Для предотвращения вторичного окисления сталей, легированных высокоактивными элементами (Al, Ti и др.), необходимо исключить их контакт с кислородом. В результате окисления углеродистых составляющих защитных смесей существенно уменьшается концентрация кислорода в контактирующей с металлом атмосфере. Но при этом существует риск науглероживания расплава, поэтому защита инертными газами, в настоящее время, наиболее эффективна и распространена в современной металлургии.

Существует противоречивое мнение по производству рельсов. При производстве рельсов и колес для железнодорожного транспорта присутствие глинозёмистых включений недопустимо. С целью минимизации включений в стали, разработка технологии в России продолжает развиваться с уклоном полного отказа от алюминия как основной раскислитель. Несмотря на то, что значительное

улучшение чистоты рельсовой стали и повышение её металлургического качества в России достигнуто в результате перехода от ковшового раскисления стали алюминием к раскислению её комплексными раскислителями без алюминия [116]. Комплексное раскисление рельсовой стали лигатурами без применения алюминия позволило исключить образование в головке рельсов строчек включений глинозёма, являвшихся очагами зарождения контактно-усталостных повреждений рельсов. Отсутствие строчечных неметаллических включений в головке рельсов привело к повышению их эксплуатационной стойкости. По мнению автора данной диссертации, не было попыток минимизировать неметаллические включения на основе алюминия по мероприятиям, направленных на получения «чистой стали» по кислороду без исключения алюминия.

Степень вредности включений в подшипниках оценивают по их влиянию на контактную усталостную долговечность. Последняя, наряду с составом включений, зависит от их размеров. Образцы с оксидными включениями менее 10 мкм имеют усталостную долговечность, на порядок большую, чем образцы с оксидами крупнее 20 мкм [154].

Существует следующая особенность разливки стали на криволинейных УНРС. В заготовках наблюдаются скопления крупных включений, расположенных преимущественно со стороны малого радиуса. Эти включения при всплывании к зеркалу металла в кристаллизаторе запутались в осях дендритов на фронте кристаллизации. Подобные дефекты классифицируются по ГОСТ Р 58228-2018 (ранее по ОСТ 14-1-235-91) как краевое точечное загрязнение (КТЗ) в виде точечных скоплений включений, располагающих вдоль поверхности круга и бьюма. Данный дефект в большой мере проявляется со стороны малого радиуса непрерывнолитой заготовки (для криволинейных УНРС).

Опыт «ОЭМК» (г. Старый Оскол) производства «чистой стали» марки ШХ15 по непрерывной разливке стали на УНРС говорит о следующих требованиях к производству [154]:

- точность поддержания уровня металла в кристаллизаторе (снижение включений на основе шлакообразующей смеси (ШОС) кристаллизатора) – данное

мероприятие помогло снизить содержание неметаллических включений в 2 раза;

- благоприятные потоки металла в кристаллизаторе (дизайн разливочного стакана (размеры отверстий, количество отверстий и угол выхода металла из стакана и пр.) и оптимальное заглубление стакана под уровень металла – данные мероприятия позволили снизить содержание неметаллических включений в 2-3 раза;

- применяемые материалы для футеровки промежуточного ковша и внутренний дизайн промежуточного ковша (огнеупорные перегородки, металлоприёмники) в комплексе применяемых ШОС для промежуточного ковша – данные мероприятия снизили содержание включений в 2-3 раза;

- автоматическая подача ШОС в кристаллизатор – данное мероприятие помогло снизить балл по КТЗ до 0,5.

Таким образом, представленные выше организационные мероприятия на УНРС, позволили повысить чистоту стали ШХ15 в разы.

Возможен и такой путь загрязнения металла неметаллическими включениями из-за косвенных причин. Например, разливка на УНРС стали с «холодным» зеркалом в кристаллизаторе повышает содержание в металле неметаллических включений. Это быть при производстве заготовок с низкой скоростью разливки или при недостаточном перегреве металла над температурой ликвидус. В этом случае на зеркале металла в слое защитного шлака может плавать «шлакометаллическая корочка». На ней в процессе разливки оседают всплывающие неметаллические включения, то есть разливка «холодного» металла с минимальным перегревом над температурой ликвидус (от 1 до 5 °С) может приводить к повышению неметаллических включений в стали.

Нормы на допустимое содержание разных включений (оксидов и сульфидов) в прокате обычно установлены в соответствии с ГОСТ, техническими условиями и соглашениями. Например, для контроля загрязнённости проката неметаллическими включениями используют металлографический метод по ГОСТ 1778. Металлографический метод оценки загрязнённости металла включениями предусматривает изготовление шлифов шириной 20 мм и длиной, равной половине толщины заготовок, включая все структурные дендритные зоны. Шлифы про-

смаатриваются при увеличении в 100 раз. К крупным включениям относят те, которые имеют размер более 40 мкм, что соответствует баллу 2-3 шкалы ГОСТ 1778.

Кроме ГОСТ 1778 металлографические исследования неметаллических включений в качественных сталях проводят согласно других общепринятых стандартов: ASTM E 1245, ASTM E 2142, ASTM E 45, DIN EN 10247, ASTM E 2283 и др. В современной металлургии обычно говорят о следующих показателях, которые позволяют оценить чистоту стали по включениям [251]:

- количество включений (шт./мм²);
- размер неметаллического включения (мкм);
- химический состав и морфология включений;
- равномерность распределения включений в объёме металла;
- содержание общего кислорода в металле (ppm или мас. %);
- источники образования неметаллических включений (эндогенные, экзогенные и экзо-эндогенные).

На основании работ [8, 9, 15, 16, 251] можно заключить, что экзогенные включения достаточно полно удаляются из жидкой стали, а основная масса включений, встречающихся в твердой стали, принадлежит к классу эндогенных, образующихся в результате сложных физико-химических процессов в жидком, затвердевающем и твёрдом металлах. Имеют место быть обнаружения крупных неметаллических включений, так называемых кластерных на основе магния и кальция.

Исследования неметаллических включений по типу и источников их происхождения осуществляется с использованием методов оптической металлографии и электронной микроскопии, а также других методов исследований включений [92] и интерпретации этих данных методами термодинамического моделирования.

Кроме этого существует положительный пример комбинации двух известных методов исследования неметаллических включений: фракционный газовый анализ (ФГА) и электрохимическое растворение с последующим анализом включений на электронном микроскопе (исследование включений в формате 3D) [58, 243]. Такой подход позволяет точно определить состав, размер и морфологию не-

металлических включений в отобранных пробах металла и установить источник их поступления для конкретного производства. В данных работах было отмечено, что рекомендуется получать содержания общего кислорода не более 0,0020 мас. %.

Согласно работы [257] было установлено, что крупные экзогенные включения неравномерно распределены в объёме готовой продукции, которые нельзя описать методами, применяемыми сегодня в промышленности. Поэтому была предложена оригинальная методика интерпретации результатов измерений, полученных по стандарту ASTM E 2283, позволяющая расширить границы его применимости на экзогенные включения. Была представлена методика ASTM E 2283 для выявления случайных одиночных экзогенных включений среди обнаруженных неметаллических включений, а также для прогнозирования размеров максимально возможных экзогенных включений, если последние имеют системный источник попадания в расплав и описывается соответствующим распределением Гумбеля.

В работе [257] было также представлено, что на данный момент производимая оценка неметаллических включений в промышленности необъективна и требует разработки и корректировки подходов для проведения сдаточного контроля, в том числе между переделами, а также для совершенствования получения этих сталей.

По данным японских исследователей [18, 130] различный вклад образования неметаллических включений от выплавки до промежуточного ковша представлен на рисунке 1.1: влияния выпуска стали – 10 %, влияния сталеразливочного ковша – 60 % и промежуточного ковша – 30 %.

Такой подход оценки следует осуществлять для каждого производства и цеха отдельно. Следует оценить степень влияния каждого этапа производства стали: выпуски плавки, нахождение металла в сталеразливочном и в промежуточном ковшах. К сожалению, в настоящее время отсутствует единая методика или подход установления такого влияния с учётом технологических процессов, протекающих на современном производстве.

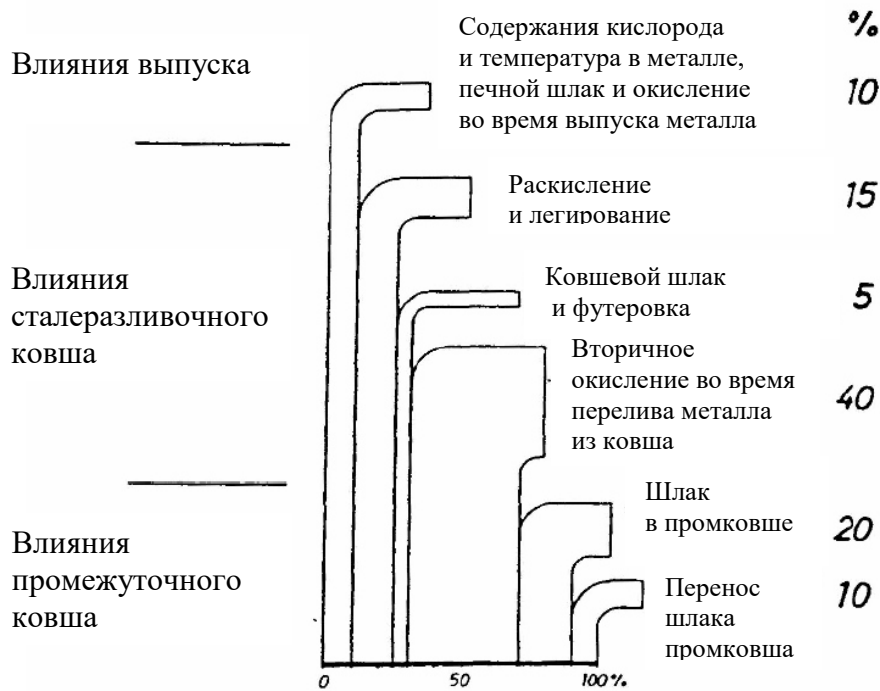


Рисунок 1.1 – Различный вклад внесения включений в сталь на разных этапах производства

Авторы [175] предложили улучшенный метод классификации неметаллических включений по трём уровням с применением стандарта ASTM E 2142. Один из уровней классификации включает установление источников экзогенных включений. В зависимости от состава, включения подразделяются на четыре категории: результат вторичного окисления металла; огнеупоры сталеразливочного или промежуточного ковшей; шлак сталеразливочного или промежуточного ковша и эрозия огнеупоров металлопроводки УНРС. Данный уровень классификации актуален для сталеплавильного производства, так как определяет необходимость реализации конкретных технологических решений и мероприятий по снижению в металле неметаллических включений.

Анализ результатов производства преобладающей части сортамента сталей на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях отчетливо свидетельствует о взаимном влиянии процессов, происходящих в ковше, что делает проблему обеспечения определенного вида включений и их заданной концентрации в стали крайне сложной [131].

Во многих случаях неметаллические включения являются причиной отсортровки металла по результатам ультразвукового контроля вследствие обнаружения расслоений как в осевой зоне проката, так и в близи поверхности, поверхностных дефектов типа плена или «пузырь-вздутие», трещин и других. На ОАО «Северсталь» были выполнены детальные исследования сталеплавильных дефектов на стали 08Ю и IF [131]. В областях, прилегающих к дефектам, всегда присутствуют крупные неметаллические включения или скопления включений. В основу неметаллических включений входят составляющие соединения оксидов Al, Si, Ca, Ti и Mn. В основу дефекта «пузырь-вздутие» входят оксиды Al и Ca с добавками оксидов Si, Ti и Mn. Также могут быть оксиды на основе Al-Mn, Al-Si с незначительными добавками V и Ti, а также оксидные частицы сложного состава на основе Al-Ca с добавками Mg, Si, Ti и Mn. Идентификация в составе включений оксидов Ti, V свидетельствует о существенном влиянии на формирование дефектов процессов вторичного окисления металла.

Авторы работы [131] считают, что существует два подхода снижения неметаллических включений. В первом, для предупреждения возможности образования включений определенного типа предполагается исключение или существенное ограничение использования материалов, которые могут приводить к их формированию. Эти ограничения, в частности, касаются использования алюминия в производстве рельсовых, кордовых, ряда трубных марок сталей из-за отрицательного влияния корундовых и алюминатных включений на механические и другие служебные характеристики металла или применение силикокальция и других кальцийсодержащих материалов в производстве трубных сталей с высокой коррозионной стойкостью в водных хлорсодержащих средах. По мнению автора данной диссертации – это не перспективное направление работы в случае если полностью исключается алюминий как раскислитель. Второй подход по мнению этих же авторов [131] учитывает, что как общее количество неметаллических включений в готовой стали, так и их природа определяются не только образованием включений по ходу обработки металла, но и характером их трансформации и степенью ассимиляции шлаком в процессах ковшевой обработки и непрерывной разливки.

Как свидетельствуют результаты большого числа промышленных исследований с использованием стабильных маркеров металла и шлака, путь, основанный на удалении включений, является намного более эффективным. Для реализации второго, более прогрессивного подхода, к управлению неметаллическими включениями в стали необходимы представления о процессах, которые протекают при рафинировании (раскислении и десульфурации); доведении химического состава (введение ферросплавов, лигатур и других присадок) стали; модифицировании неметаллических включений; продувке расплава инертным газом; взаимодействии металла со шлаком при ковшевой обработке и непрерывной разливке; при кристаллизации слитка. В данной диссертации второй подход будет рассматриваться более подробно, так как следует проводить исследования для контроля процессов образования неметаллических включений в период активной работы с жидким и кристаллизующимся металлом.

1.2 Понятие о производстве «чистой стали» по содержанию оксидных и сульфидных неметаллических включений

При любом способе выплавки жидкая сталь взаимодействует с кислородо-содержащей атмосферой. Возможность получения в промышленных масштабах чистого кислорода вывела на первый план в чёрной металлургии кислородно-конвертерный способ производства стали, а также технологию современной электросталеплавильной плавки, предусматривающей её интенсификацию продувкой сталеплавильной ванны кислородом в периоды плавления и окисления. В результате жидкая сталь может содержать значительное количество кислорода (косвенно – это неметаллические включения), который существенно влияет на технологические и эксплуатационные свойства стали.

Что такое «чистая сталь»? Когда неметаллические включения не вредны для стали? Какие размеры включений критичны? Как химический и морфологический состав неметаллических включений влияет на качество стали? Как определить допустимое содержание включений в стали в зависимости от типа продук-

ции? Какой главный показатель чистоты по оксидным неметаллическим включениям? Все эти вопросы до сих пор актуальны в современной металлургии, несмотря на то что они были заданы в период начала исследований включений.

Чистота стали является важным фактором её качества. Поэтому потребность в более чистых сталях растёт с каждым годом. Так называемые «чистые стали» – это обычно стали, в которых содержание примесей, таких как, фосфор, сера, кислород, азот, водород, иногда и углерод, а также неметаллических включений очень низкое. Повышение чистоты стали становится все более и более важной целью для учёных-металлургов, а также важной задачей для производителей стали. Потребность в сталях с повышенными механическими свойствами вынуждает её производителей повышать чистоту их конечной продукции. Чтобы достичь высокой чистоты стали необходимо контролировать и совершенствовать весь комплекс технологических операций в ходе всего процесса производства стали, таких как раскисление, легирование, внепечная обработка стали и разливка.

Контроль качества стали, производимой в сталеплавильном производстве, требует точных методов оценки её чистоты по неметаллическим включениям. В некоторых случаях необходимо анализировать плотность микровключений на единицу площади шлифа, состав включений, их распределение по размерам, наличие в стали макровключений. Для этой цели существуют прямые методы анализа (являются контрольными, очень дороги и продолжительны по времени анализа) и непрямые – менее затратные, но служащие лишь относительными индикаторами качества.

Прямой контроль включений: металлографическое исследование (визуальный контроль), компьютерный анализ изображения на оптическом микроскопе, сканирующая электронная микроскопия и ультразвуковое тестирование. На практике время, затрачиваемое на прямой контроль неметаллических включений от разливки металла до выдачи результатов, составляет значительное время как минимум несколько суток.

Косвенный контроль включений – это анализ содержания общего кислорода и прирост концентрации азота в период перелива металла из сталеразливочного

ковша. В настоящее время на некоторых металлургических предприятиях не в полном объёме реализован косвенный контроль качества металла из-за отсутствия достаточных ресурсов: персонал и испытательное оборудование.

Известно, что общий кислород определяет чистоту стали по оксидам. Содержание связанного кислорода в виде оксидов зависит от технологии раскисления и удаления включений в ковше, а также применяемой практики разливки металла. Кислород, находящийся в жидкой стали, вследствие резкого уменьшения возможной его концентрации в твёрдой стали, выпадает из раствора в момент кристаллизации и тут же формируются нежелательные оксидные включения. Так как эти процессы происходят на поздней стадии перехода жидкости в твёрдое состояние, то уже нельзя рассчитывать на всплывание образовавшихся оксидов. Поэтому сталь получается более чистой и будет отличаться лучшим качеством, в которой в момент затвердевания осталось мало общего содержания кислорода (растворенного и взвешенного в окислах) [57, 117].

На рисунке 1.2 представлена схема «круговорота» содержания общего кислорода в руде, чугуна и стали на различных переделах чёрной металлургии. В сталеплавильном переделе конечная концентрация общего кислорода в жидкой стали находится в диапазоне от 1 до 50 ppm (от 0,0001 до 0,0050 мас. %), а в твёрдой стали от 5 до 35 ppm (от 0,0005 до 0,0035 мас. %). Эти концентрации кислорода обусловлены физико-химическими процессами, которые протекают в процессе производства и разливки стали при взаимодействии с кислородом из атмосферы воздуха, шлаком и огнеупорной футеровки [266, 268]. В данной диссертационной работе рассматривается сталь раскисленная алюминием и не рассматриваются металлические цветные примеси (Cu, As, Sn, Sb и др.), которые также характеризуют чистоту стали и влияют на её качество. В общем понятии «чистоты стали» следует опираться на содержание в стали следующих примесей и газов: $[O]_{\text{общ}}$, [H], [N], [S] и [P] (таблица 1.2). Гуляев А.П. называл «чистой сталью» такую сталь, в которой сумма всех атомов примесей и газов на 1 млн. атомов железа составляет менее 1500 [19]. Кроме этого одновременно предлагается к «чистой стали» относить сталь с объемной долей включений не более 0,02 об. %.



Рисунок 1.2 – Схема содержания общего кислорода на различных переделах в чёрной металлургии

Таблица 1.2 – Содержание вредных примесей, газов и объемной доли неметаллических включений для «чистой стали» по данным А.П. Гуляева

Содержание примесей и газов		Электросталь	Кислородно-конверторная сталь
[O] _{общ}	мас. %	0,0020–0,0040	0,0050–0,0080
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 150	~ 350
[H]	мас. %	0,0004–0,0006	0,0001–0,0005
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 250	~ 150
[N]	мас. %	0,0070–0,0100	0,0020–0,0500
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 300	~ 100
[S]	мас. %	0,0100 – 0,0200	0,0200 – 0,0300
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 300	~ 500
[P]	мас. %	0,0100 – 0,0200	0,0200 – 0,0300
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 300	~ 500
Сумма всех загрязнений, атомов на 1 млн. атомов железа		~ 1300	~ 1600
Объемная доля неметаллических включений, об. %		около 0,020	нет данных

На основании этого, характеристики стали по оксидным включениям принято относить концентрацию общего кислорода в стали. Содержание серы характеризует металл по чистоте сульфидных включений. В настоящее время в современной металлургии решена задача получения стали с содержанием серы менее 0,0010 мас. %. Способы получения такой стали известны и описаны в открытых источниках и публикациях [27, 43, 74, 215, 226, 228, 229, 237, 250, 258]. Еще 30 лет назад было выполнено огромное количество исследований по сульфидным и оксисульфидным неметаллическим включениям в сталях при содержании серы в металле более 0,0150 мас. % [39]. Сегодня вопрос получения стали с низким (менее 0,0150 мас. %) и ультранизким (менее 0,0010-0,0050 мас. %) содержанием серы в современной металлургии решен.

В настоящее время существуют стандарты, которые ограничивают содержание серы в стали не более 0,0010 мас. % и кислорода не более 0,0010 мас. % [43]. Еще в начале 70-х годов такие требования выглядели труднодостижимыми, но могли быть выполнены только при использовании особо чистых шихтовых материалов и переплавных процессов, прежде всего электрошлакового переплава. Например, допустимое по стандарту содержание серы и фосфора в конструкционных сталях достигало 0,040 мас. %, то есть в 40 раз выше, чем требуется сейчас. Новые способы разливки, например, «тонкий сляб» (70-105 мм) и специализированное назначение металла (производство сварных труб) показывает, что необходимо производить сталь с содержанием серы менее 0,0030 мас. % и иногда менее 0,0010 мас. % и общего содержания кислорода менее 0,0020 мас. %. В иных случаях отмечается аварийная работа разливочного оборудования (затягивание разливочных стаканов тугоплавкими включениями, прорывы кристаллизующейся корочки металла и др.) и снижение качества металлопроката (ухудшение механических свойств, расслоение металла, повышенная ликвация серы, поверхностные не допустимые дефекты – трещины, плены и др.).

Проблема затягивания металлопроводки во время разливки известна в мировой металлургии более 60 лет [43, 129]. Исходя из текущего положения развития технологии в сталеплавильном производстве [35, 75, 83, 84, 91, 93] можно

утверждать, что в настоящее время в современной металлургии успешно решена задача по разливаемости стали раскисленной алюминием с применением модифицирующей обработки кальцием совместно с мероприятиями, исключающими процессы вторичного окисления металла на производстве. Несмотря на это, есть много новых публикаций по данной проблеме, что говорит о существовании нерешенной задачи разливаемости «чистой стали» на УНРС для отечественных и зарубежных предприятий.

В середине 80-х годов трубная фирма «Валлурек» (производитель сварных газопроводных труб большого диаметра для трансконтинентальных газопроводов) начала активно внедрять технологию модифицирования стали кальцием, с целью исключения зарастания разливочных стаканов и стопоров на УНРС для стали раскисленной алюминием [43]. В данном типе стали присутствуют твёрдые неметаллические глинозёмистые включения (они плавятся при 2000 °С). Обладая большой адгезией к огнеупорным материалам, содержащим MgO, они закупоривают каналы стопорных устройств. При вводе в расплав кальция вместо твёрдых частиц глинозёма (корунда), в нём образуются включения алюмината кальция, находящиеся в жидком состоянии при температурах разливки стали.

В материалах международного симпозиума по обработке стали кальцием было выдвинуто следующие предположения [43]. Только при низком содержании серы достигается требуемое модифицирование неметаллических включений (менее 0,0050 мас. %), в ином случае могут образовываться такие же тугоплавкие неметаллические включения – сульфид кальция (CaS).

До внедрения массовой технологии модифицирования металла кальцием все сталеплавильщики испытывали проблему при производстве стали раскисленной алюминием с контролируемым зерном (маркировочной пробе содержание алюминия более 0,01 мас. %). Обнаруживались крупные алюминатные включения в непрерывнолитых заготовках, а также отмечались частые нарушения нормального процесса разливки на УНРС. Предлагалось снижать и даже исключать ввод алюминия в расплав, что по мнению многих исследователей являлось не со-

всем оптимально с точки зрения получения качественной продукции с низким содержанием включений. Но модифицирующая обработка стали кальцием решила проблему разливаемости металла на УНРС совместно с мероприятиями, исключая процесс вторичного окисления во время производства.

На потребительские свойства готовых изделий решающее воздействие оказывают не столько эндогенные, сколько единичные крупные экзогенные неметаллические включения, которые согласно любому из действующих стандартов не подлежат оценке и описываются лишь словесно.

Обычно неметаллические включения размером 40-50 мкм и более в готовом прокате имеют экзогенную природу происхождения, либо представляют собой скопления эндогенных включений, попавших в металл при непрерывной разливке. В зависимости от технологии выплавки и способов непрерывной разливки экзогенные включения достаточно полно удаляются из жидкой стали, а основная масса включений, встречающихся в твёрдой стали, принадлежит к классу эндогенных, образующихся в результате различных физико-химических процессов в жидком, затвердевающем и твёрдом металлах.

Основная часть образовавшихся включений успевает всплыть и удалится в шлак, однако какая-то часть остается. В непрерывнолитой стали включения присутствуют в виде кристаллов и глобулей. После деформации металла включения меняют форму и расположение, которые видны под микроскопом в виде нитей, строчек, цепочек, ориентированных преимущественно в направлении деформации. Включения, в зависимости от химического состава, принято в основном делить на сульфиды (FeS , MnS , CaS и т.п.) и оксиды (FeO , MnO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и т.п.). Кроме того, существуют фосфиды (Fe_3P , Fe_2P , Mn_2P_2 и т.п.), карбиды (Fe_3C , Cr_3C_2 , Cr_4C , Cr_7C_3 , Mn_3C , VC , WC , Mo_6C и т.п.), нитриды (AlN , VN , Fe_3N , TiN , Nb_2N , CrN , Cr_2N , Mo_2N и т.п.), карбонитриды ($\text{Ti}(\text{NC})$, $\text{V}(\text{CN})$, $\text{Nb}(\text{CN})$ и т.п.), количество которых обычно в металле не так велико, как оксидов и сульфидов. Также широко встречаются сложные и комбинированные соединения включения ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-CaS}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaS}$ и т.п.). Неметаллические включения находятся в стали в виде отдельных фаз.

Они принимают участие во всех процессах и явлениях, которым подвержена сталь на производстве. В структуре стали могут быть различные включения, которые образуются в результате реакций компонентов стали с кислородом и серой.

Также важная составляющая в вопросе включений – это их фазовое состояние в расплаве: твёрдое или жидкое [129]. К твёрдым неметаллическим включениям относят: Al_2O_3 , $CaO \cdot 2Al_2O_3$, $CaO \cdot 6Al_2O_3$, шпинели, MnS , CaS и др. Это самые вредные неметаллические включения, которые влияют на свойства стали, приводят к неудовлетворительной разливаемости стали (затягивания металлопроводки тугоплавкими включениями и последующий их «смыв» в слиток) и к образованию дефектов в отлитой стали (трещины, плены, разрушения и пр.). К менее вредным жидким неметаллическим включениям относят: $12CaO \cdot 7Al_2O_3$, FeO , FeS , $MnO \cdot SiO_2$ и др.

За рубежом понятие «чистой стали» по оксидным включениям было сформулировано в 2001 году в Бельгии в Технологическом комитете (TECHCO), основанном Международным институтом стали и чугуна (IISI) [100]. В TECHCO было сформулировано, что оксидными неметаллическими включениями может управлять человек, то есть низкое содержание оксидов в стали – это успех в технологии производства стали и подтверждение высокой культуры производства. Таким образом отмечается важность организации процесса производства высококачественной стали.

Там же были определены следующие направления в улучшении технологии:

- первичное раскисление металла на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата;
- внепечная обработка стали на установке ковш-печь (УКП) и вакууматоре;
- непрерывная разливка на УНРС.

Общие принципы технологии «чистая сталь» – это ужесточенный контроль технологического процесса и непрерывного мониторинга ключевых технологических параметров в цехе (содержание растворенного кислорода в расплаве, расход материалов и энергоносителей, временные технологические параметры и пр.).

Данный контроль обычно в современном цехе осуществляется за счёт применения автоматических средств мониторинга технологии и статистических средств обработки информации.

Технологический контроль чистоты стали

Чистота стали контролируется в ходе всех технологических операций, в которые входит следующее [100, 266, 268]:

- время и место ввода в расплав раскислителей;
- время и место ввода в расплав ферросплавов;
- длительность и последовательность печных и внепечных обработок стали;
- практика продувки расплава инертными газами;
- хронология передачи жидкой стали от агрегата к агрегату;
- конструкция (дизайн) сталеразливочных и промежуточных ковшей и методы работы с ними;
- особенности различных шлакообразующих материалов и их применение;
- способы разливки стали.

Таким образом, повышение требований к качеству металла определяет поиск способов снижения количества неметаллических включений и её чистоты путем применения доступных технологий и методов.

**1.3 Повышенные требования к современному производству стали и поиск
баланса в производственной системе:
себестоимость-производительность-качество**

Согласно стандарту СТО Газпром 2-4.1-713-2013 для производства труб и соединительных деталей ужесточены требования по неметаллическим включениям, которые влекут за собой пересмотр всей технологической концепции современного производства стали. Оговариваются требования к неметаллическим включениям в металле по максимальному баллу. Соответственно, это может привести к браку металла. Неметаллические включения могут быть причиной разрушения электросварных высоконагруженных труб, вероятность разрушения кото-

рых возрастает с увеличением размеров включений и их количества. Значительное влияние крупных включений проявляется в тонкостенных трубах.

При внедрении технологии получения «чистой стали», существует мнение, что «чистая сталь» – это не всегда высокое качество, так как во время её производства сталеплавильщики сталкиваются с другими дефектами, которые возникают на стадии разливки и не зависят от технологии выплавки и внепечной обработки стали, что в итоге приводит к некорректным выводам и неверному развитию технологии.

Многие авторы приходят к выводу, что концепция «чистой стали» вообще не может быть реализована на практике, а причиной разрушения металла следует считать не структуру матрицы металла, а вид и морфологию неметаллических включений [14, 24]. В итоге отсутствие концепции получения «чистой стали» и учёта всех происходящих процессов в единой технологической цепочке: «выплавка-выпуск плавки-внепечная обработка-разливка стали», приводит к ошибочным решениям в ущерб себестоимости стали, качества металлопродукции или производительности цеха. К сдерживающим факторам получения «чистой стали» относят дополнительные затраты на дорогостоящие материалы, а также снижение производительности агрегатов, решение дополнительных организационных вопросов, например, соблюдения режима продувки расплава инертным газом и дополнительных технологических операций (вакуумирование, модифицирование, инертнизация металла и др.). Таким образом, разработка, внедрение и поддержание технологии «чистой стали» в условиях современных сталеплавильных цехов с комплексным учётом повышенных требований к качеству, производству и себестоимости представляется весьма актуальной научно-технической проблемой [266].

В 80-х годах прошлого века началось массовое внедрение новой технологии – ковшевая обработка стали синтетическим шлаком, названной по именам своих создателей методом Перрена (Франция) – Точинского (Россия, тогда СССР). Этот метод внепечной обработки стали позволил добиться заметного обессеривания стали, снижения содержания в ней кислорода и неметаллических включений.

ний [43]. Но при всей своей простоте он оказался слишком дорогим и энергозатратным. В этот же период времени один за другим стали появляться агрегаты (установки) вакуумной дегазации жидкой стали, продувки её нейтральными и активными газами [43].

Влияние огнеупоров на неметаллические включения

Практически все современные сталеплавильные цеха применяют футеровку сталеразливочного и промежуточного ковшей, в состав которых входит MgO, из-за этого в металле часто обнаруживаются включения, в состав которых входит магний и магнезиевая шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$). В сталеразливочном ковше формирование этих включений обычно объясняется через взаимодействие огнеупоров с расплавом и шлаком, что в итоге приводит к образованию как эндогенных, так и экзогенных включений [216].

Основные типы огнеупоров, используемые в футеровке стен и дна сталеразливочных ковшей, в состав которых входит MgO: периклазоуглеродистые ($MgO-C$), периклазоалюмоуглеродистые ($MgO-Al_2O_3-C$), алюмопериклазоуглеродистые ($Al_2O_3-MgO-C$), периклазоизвесткоуглеродистые, они же периклазодоломитоуглеродистые, ($MgO-MgO \cdot CaO-C$), алюмопериклазовые (Al_2O_3-MgO) – изделия и алюмопериклазовый (алюмошпинельный) бетон (Al_2O_3-MgO) [244].

Применение футеровки сталеразливочных и промежуточных ковшей из оксида магния, связано с термодинамической стабильностью к различному химическому составу шлака и его доступностью, и распространённостью в металлургии. Для температур сталеварения 1500-1700 °С на рисунке 1.3 представлена стабильность оксидов, которая снижается в следующем ряду: $CaO \rightarrow ZrO_2 \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow MgO \rightarrow SiO_2$ [3].

В таблице 1.3 представлены преимущества и недостатки оксидных основ огнеупорных материалов для сталеразливочного и промежуточного ковшей и их применимость в металлургии.

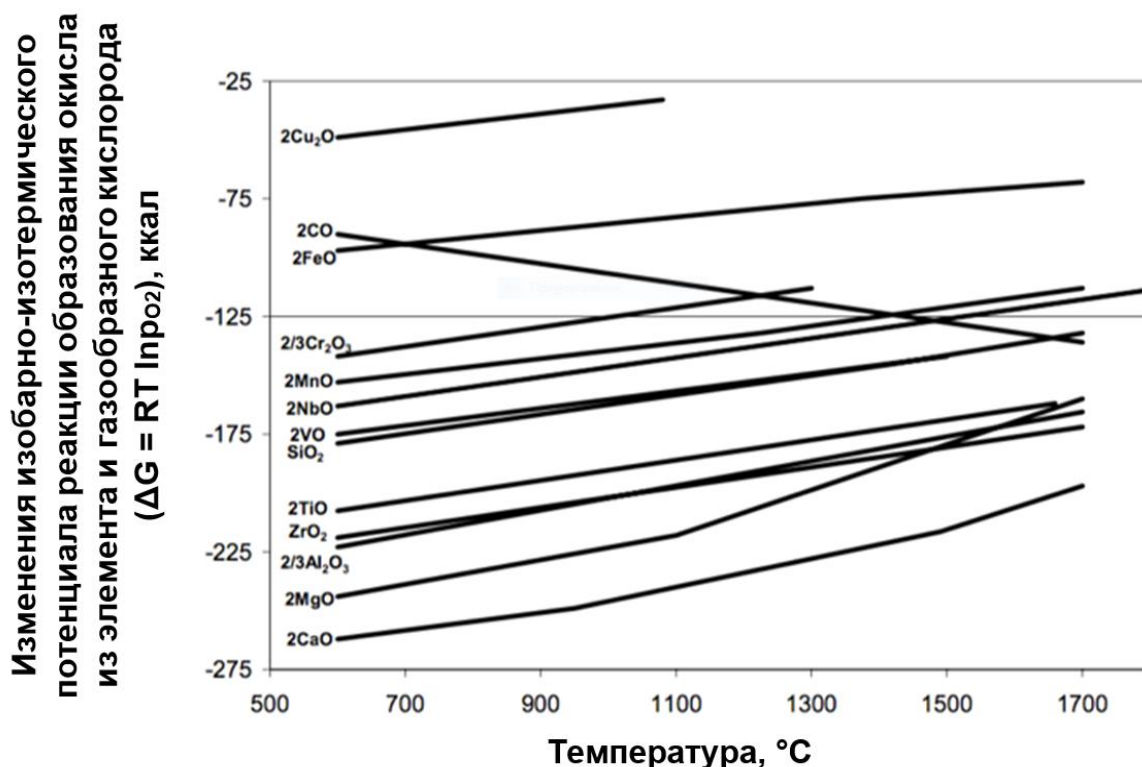


Рисунок 1.3 – Диаграмма Эллингема для реакции образования оксидов или зависимость изменения изобарно-изотермического потенциала реакции образования окисла из элемента и газообразного кислорода от температуры

Таблица 1.3 – Преимущества и недостатки основ огнеупорных материалов для ковшей и их применимость в металлургии

Основа огнеупорного материала	CaO	ZrO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Описание	Гигроскопичен. Реагирует с Al ₂ O ₃ и может образовывать легкоплавкие соединения. Не подходит для большинства технологических операций по производству стали.	Низкая доступность и высокая стоимость.	Стабильный оксид. Точка плавления чистого MgO высокая (~2800 °C), что обеспечивает высокую устойчивость к остаточным соединениям (примесям). Все эти свойства позволяют изготавливать футеровку из MgO более низкой чистоты. Соединения MgO, такие как оливин (Mg, Fe) ₂ SiO ₄ могут привести к образованию шпинели (формируются дефекты в стали из-за неметаллических включений).	Химически чистый материал. Низкая реактивность и взаимодействие с компонентами в стали. Высокая плотность и низкая пористость. Самый низкий кислородный потенциал. Нет магния в стали, что исключает формирование магниевого шпинели. Существуют два вида Al ₂ O ₃ : чистый оксид алюминия из табулярного сырья (самый дорогой материал) и оксид алюминия на основе бокситов.	Низкая температура плавления. Очень восприимчив к разрушению при температурных колебаниях и при наличии примесей. Может реагировать с компонентами стали (Al, Ti, Mn), что приводит к вторичному окислению расплава. Ограничения по экологии.
Применимость в металлургии	Нет	Шлаковый пояс металлпроводки, стакан-дозаторы и шибберные плиты.	В настоящее время это самый популярный материал для футеровки.	Футеровки нового поколения. В процессе внедрения. Развития новых технологий в металлургии.	Нет

В таблице 1.4 представлена совместимость огнеупоров и шлака [217], которую также следует учитывать при выборе типа футеровки в зависимости от главного оксида в шлаке. Исходя из таблицы 1.4 наиболее универсальный материал для всех типов металлургических шлаков – это периклазоуглеродистые огнеупоры (MgO-C). Также возможно применение огнеупоров на основе Al_2O_3 , но при этом в шлаке должен отсутствовать оксид железа или марганца.

Высокая термодинамическая стабильность огнеупорного материала в системе Al_2O_3 -MgO в виде бетона в сравнении с периклазоуглеродистыми огнеупорами поможет решить технологические задачи в металлургическом производстве [244]. Корундопериклазовый огнеупор (бетон) целесообразно использовать в производстве высококачественных трубных низколегированных малоуглеродистых марок стали с низким содержанием серы, фосфора, азота, общего кислорода. Низкий окислительный потенциал кислорода, присущий именно футеровке на основе Al_2O_3 , что способствует предотвращению окисления от огнеупора в процессе внепечной обработки стали, а также исключена возможность формирования магниезальных шпинелей.

Таблица 1.4 – Совместимость огнеупоров и шлака

Тип огнеупора	Главный оксид в шлаке			
	FeO, MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
Низкая концентрация Al ₂ O ₃	«-» «-»	«+» «+»	«+» «+»	«+»
Высокая концентрация Al ₂ O ₃	«-»	«+» «+»	«+» «+»	«+»
Mg-Cr	«+»	«+» «+»	«+»	«+» «+»
MgO	«+» «+»	«-»	«+»	«+» «+»
MgO-C	«+» «+»	«+»	«+»	«+» «+»
Доломит	«+»	«+»	«-»	«+» «+»
Высокая концентрация SiO ₂	«-» «-»	«+» «+»	«+»	«-»

«+» «+» – высокая совместимость и отсутствие влияния на формирование включений;
«+» – совместимость, незначительное формирование включений, незначительный износ огнеупора;
«-» – несовместимость, формируются неметаллические включения, износ огнеупора;
«-» «-» – несовместимо, высокий износ огнеупоров с образованием значительного количества включений

Исходя из данных литературных источников и практики работы сталеплавильных цехов можно сделать следующий вывод, что периклазоуглеродистый материал в сталеразливочном ковше подходит для производства «чистой стали» раскисленной алюминием. И переход футеровке на основе глинозёма – это следующий шаг решения вопроса «чистоты стали».

1.4 Проблемы производства «чистой стали» в современных сталеплавильных цехах

Рассмотрев доклады из конгрессов сталеплавильщиков [45-47, 49-56, 60-62, 65-70, 76-80, 106-114, 124-128, 136-145, 156-161, 177-181, 218, 243-248] по тематике производства «чистой стали», опубликованных в сборниках трудов с 1993 по 2018 г. сделаны следующие выводы. Задача получения «чистой стали» остается актуальной и в будущем будет видоизменяться, а также достигать своего развития совместно с последними достижениями в науке и технике как на производстве, так и в исследовательских лабораториях. За 25 лет прикладная наука в области неметаллических включений дала соответствующие результаты в действующие технологии производства стали на отечественных предприятиях. В настоящее время производители стали понимают какие основные мероприятия наиболее эффективны для снижения включений в готовой стали. Данные мероприятия по «чистой стали» были известны еще в начале 90-х годов, но фактическая реализация в России началась в конце 90-х – в начале 2000-х и продолжается до сих пор, но уже в более сложной и комплексной форме. Были учтены различные причины образования неметаллических включений: от организационных и до технических составляющих. Также отмечено значительное влияние этих мероприятий на увеличение себестоимости стали и в большинстве случаев отсутствовала экономическая составляющая, с учётом будущих перспективных горизонтов заказов такой стали. По этим причинам в то время не всегда предприятия шли на производство «чистой стали», но в настоящее время из-за ужесточения

требований по неметаллическим включениям от потребителей металлопродукции ситуация изменилась.

Ниже представлены 12 структурированных общих блоков эффективных мероприятий и полученные результаты на практике для производства «чистой стали» из докладов конгрессов сталеплавильщиков с 1993 по 2018 г.

1. Контроль и оценка содержания неметаллических включений

Контроль общего содержания кислорода в готовой стали. Применение комбинации различных методов оценки содержания неметаллических включений (фракционный газовый анализ, электролитический метод и пр.). Было установлено, что размер включений должен быть менее 20-40 мкм и они должны быть равномерно распределены в металле. Отмечено, что негативное влияние на качество стали будет в большей степени при размере неметаллических включений более 40 мкм.

2. Подбор огнеупоров

Уход от огнеупоров, окисляющих сталь (переход от кварцеглинистой футеровки на высокоглинозёмистую; с кварцевых стаканов на корундографитовые; с шамота на MgO или магнезитохромитовую; и пр.). Осуществлен акцент на качество и тип огнеупоров. В огнеупорных материалах должно быть ограничение по SiO₂ в виде кварцита и других вредных примесей.

3. Корректировка продувки жидкого полупродукта кислородом

Уход от практики продувки ванны кислородом до упора, с целью снижения в жидком полупродукте растворенного кислорода, что в свою очередь приводит к снижению расхода раскислителей и ферросплавов.

4. Разработка технологии с учётом фундаментальной науки

Применение фундаментальной науки и развитие прикладной науки на металлургических предприятиях. Например, основы фундаментальной науки реализованы в технологии раскисления металла, шлакообразования в ковше и модифицирования неметаллических включений кальцием. Фундаментальные основы в науке реализованы в вычислительной термодинамике с учётом металлургической практики.

5. Отсечка сталеплавильного шлака

Контроль остатка металла в сталеплавильном агрегате (болото), стабильная шихтовка плавки для ДСП или конвертера. Внедрение различных систем отсечки высокоокисленного сталеплавильного шлака.

6. Оценка вторичного окисления металла

Учитывается и минимизируется поступление кислорода в металл во время внепечной обработки стали из окислителей. Оксид SiO_2 для металла раскисленного алюминием является окислителем (он может быть, как в футеровке, так и в шлаке). Выполнение исследований вторичного окисления расплава для поиска эффективных мероприятий. Также стали известны уровни поступления кислорода в кг/т из практики и теоретических расчётов с применением термодинамического моделирования, с использованием вычислительных программ для сталеплавильных процессов.

7. Защита металла от вторичного окисления во время разливки

Одним из основных источников загрязнения металла оксидными включениями является вторичное окисление стали при её движении от сталеразливочного ковша до кристаллизатора установки непрерывной разливки стали (УНРС). Ко вторичному окислению относится взаимодействие расплава с кислородом из воздуха, взаимодействие со шлаком промежуточного ковша и огнеупорами. Также вторичное окисление в промежуточном ковше может интенсифицироваться из-за турбулентных потоков металла в промежуточном ковше при открытии защитной трубы над уровнем шлака, особенностей внутренней конструкции промежуточного ковша, колебаний уровня металла в промежуточном ковше, химического состава огнеупоров и др. Взаимодействие металла с кислородом воздуха (инжекция воздуха) может происходить через: шиберные плиты и плитую коллектор, стальную обечайку коллектора, в стык стакана-коллектора и защитной трубы; через оголенные участки металла и/или через укрывной шлак при недостаточной толщине; наполнение промежуточного ковша металла (первая плавка в серии / первый сляб / заготовка – это самое интенсивное вторичное окисление в промежуточном ковше на серии плавов). Взаимодействие металла с кислородом

шлака и футеровки в основном происходит из-за содержания в них оксида кремния – SiO_2 .

8. Вакуумирование стали

Эффективное мероприятие для удаления из металлов растворенных газов (кислород, водород и азот) и серы.

9. Увеличение ёмкости промежуточного ковша

Исправления проектных ошибок по принятым дизайнам и ёмкостям промежуточного ковша, с целью увеличения «резидентного» времени нахождения металла в ковше.

10. Мониторинг и контроль футеровки сталеразливочных ковшей

Мониторинг за сталеразливочными ковшами после смены футеровки и осуществления процесса обмыва ковшей, с целью последующего применения их в производстве «чистой стали». Внесение изменений в расходы шлакообразующих материалов (известь, флюорит, Al_2O_3 и пр.), с целью минимизации образования нежелательных неметаллических включений в готовой стали.

11. Организационные вопросы, связанные с персоналом в цехе

Обучение и мотивация персонала. Строгое разграничение наказания за проступки в технологии и отсутствие наказания за ошибку. Наставничество и передача накопленного опыта производства «чистой стали». Высокая дисциплина исполнения разработанной технологии. На предприятиях реализована система разработки и реализации улучшений как в производственных процессах и операциях, так и непосредственно на каждом рабочем месте. При наличии отклонений производственного процесса или ошибки действует следующий принцип: виноват не персонал, а система, которая неправильно его подготовила либо определила рабочее место (к сожалению, не на всех металлургических предприятиях действует данный принцип).

12. Вычислительные программы и металлургические модели на основе математического и термодинамического аппаратов

Термодинамическое моделирование с использованием вычислительных программ для сталеплавильных процессов. Металлургические модели. Прогноз

температуры металла в сталеразливочном ковше и промежуточном ковше. Модель раскисления. Модель шлака. Модель модифицирования кальцием. Модель продувки расплава аргоном. Компьютерное математическое моделирование потоков металла и движения неметаллических включений (моделирование CFD – Computerized Fluid Dynamics). В настоящее время на огромном числе конкретных примеров показано, что практически весь комплекс физико-химических процессов металлургической технологии поддается расчёту с точностью, достаточной для построения технологии.

С другой стороны, из докладов конгрессов сталеплавильщиков с 1993 по 2018 г. автором данной диссертации были структурированы и приведены 12 общих проблемных блоков, ошибочных или неверных мероприятий производства «чистой стали».

1. Недостаточный аудит технологии и организационные вопросы внедрения технологии «чистая сталь»

Отсутствует понимание состояния уровня технологии в данный момент времени (ответ на вопрос: где сейчас находимся?). Не анализируются причины отклонений, не выявляются «узкие места» и «ведущие ограничения», которые следует устранять. Не прорабатываются в полной мере главные и второстепенные мероприятия одновременно (фокус только на одну или две-три задачи, а должно быть, как минимум на 5-10 и более). Различные взгляды исследователей на процессы раскисления и вакуумной обработки стали. Не обращается внимание на важность организации производства в сталеплавильном производстве на всех переделах с целью поиска адекватного баланса и оптимума по таким показателям как себестоимость, производительность и качество непрерывнолитого металла или готовой металлопродукции. Например, отмечается сильнейшее вторичное окисление вакуумированного металла (с низким содержанием общего кислорода) на разливке и при этом не прорабатываются мероприятия для разливки такой стали. Не внедряются и не контролируются ключевые показатели производства «чистой стали». В последнюю очередь следует реализовывать мероприятия по шла-

кообразующим материалам для кристаллизатора УНРС, но не когда существует нестабильность по включениям в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

2. Нерациональная технология раскисления стали и шлака

Не совершенная технология раскисления металла на выпуске и в ковше на выпечной обработке стали. Полный уход от раскисления алюминием на выпуске из сталеплавильного агрегата, например, для транспортного металла и рельсов. Не контролируемый и нежелательный процесс восстановления кремния из SiO_2 из-за последующего раскисления металла алюминием на выпечной обработке стали.

3. Отсутствие рекомендаций по разработанной технологии для промышленного применения и внедрения

На базе фундаментальной науки имеется понимание и достаточно полное описание процессов формирования неметаллических включений в металле, но отсутствуют или не всегда существуют однозначные рекомендации в технологии для промышленного применения и внедрения.

4. Несовершенные методы оценки неметаллических включений

Существуют ошибки и разногласия в количественной оценке включений в металле, которые корреспондируются на технологию. Действующие методы оценки неметаллических включений ограничены, и зачастую вводят в заблуждения в принятии лучших решений. Классификация неметаллических включений проводится по морфологии, а не по составу. Например, ошибочная трактовка силикатов, а это на самом деле алюминатные включения или осуществляют оценку о содержании неметаллических включений в многотонной плавке с одной отобранной пробы металла и др.

5. Отсутствуют исходные данные по применяемым материалам

Отсутствует полный химический анализ применяемых материалов. Обычно используются справочные данные или данные из сертификатов материалов. Применяемые материалы и их чистота не всегда соответствуют получению «чистой стали». Отсутствует входной контроль применяемых материалов и учёт информации по всем используемым материалам, которые взаимодействуют с металлом,

шлаком и футеровкой. Не учитывается чистота используемых материалов по оксидам и примесям.

6. Рассмотрение промежуточного ковша УНРС, как агрегата для рафинировки стали от неметаллических включений

Перегородки и продувка расплава аргоном в промежуточном ковше не повышают чистоту стали достигнутую в сталеразливочном ковше. Ошибки по перспективному направлению работ в промежуточном ковше: лишние перегородки и продувочные блоки, мероприятия по промежуточному ковшу в технологии трактуются как агрегат для рафинировки стали от включений и пр. Не решены более весомые задачи и проблемы в технологии именно промежуточного ковша. Рассматривают вопрос качества металла в промежуточном ковше без учета шлака в нём. Не верный выбор шлакового режима и типа футеровки промежуточного ковша. Этот вопрос должен сразу прорабатываться на этапе проектирования и разработки технологии. Не установлена ограничивающая максимальная серийность на УНРС по увеличению неметаллических включений, то есть в большей степени решается задача производительности цеха.

7. Отлив шлака из сталеразливочного ковша перед вакуумированием

Осуществление не оптимальной операции скачивания шлака перед вакуумированием с целью исключения вспенивания и удаления водорода. Необходима другая стратегия по снижению вспенивания шлака в ковше и удаления водорода, например, снижение в шлаке оксидов, приводящих к вспениванию шлака, медленный набор вакуума, исключение ввода углеродосодержащих материалов и др.

8. Не совершенная корректировка состава шлака в сталеразливочном ковше

Отдельные работы не обращают достаточного внимания на химический состав шлака в ковше. Например, для металла раскисленного алюминием добавляют MgO в шлак, что негативно сказывается на формировании магниевой шпинели в металле. Применяется флюорит (CaF_2) для разжижения шлака, при этом в шлаке достаточно содержания оксида Al_2O_3 для получения жидкого шлака и не учитывается технический аспект применения альтернативных флюсов для ковшевого шлака.

9. Не выполняется отсечка ковшевого шлака на УНРС

Не указывается, что включения, содержащие сульфид CaS – это ковшевой шлак, попавший в промежуточный ковш. Динамическое поведение шлака в промежуточном ковше на протяжении всей серии плавов. Не учитывается в полной мере попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш и его влияние на технологию и качество непрерывнолитого металла (следы ковшевого шлака: алюминаты и CaS, и изменение процесса восстановления Si и др.).

10. Продолжительный выбор ШОС для промежуточного ковша

В настоящее время задача не решена полностью. В процессе разработки и совершенствования технологии для конкретного производства.

11. Продолжительный выбор ШОС для кристаллизатора

В настоящее время задача не решена полностью. В процессе разработки и совершенствования технологии для конкретного производства.

12. Не осуществляются разборы первопричин отклонений технологии

Не разрабатываются эффективные мероприятия, исключаяющие первопричину нарушения или отклонения технологии от заданной. Не совершенствуются действующие стандарты. Осуществление наказания персонала за ошибки, что в итоге приводит к сокрытию нарушений технологии.

Таким образом, по данным 12 эффективным и 12 ошибочным или неверным мероприятиям производства «чистой стали» возможно сформулировать направления в разработке технологии получения стали высокой чистоты в условиях современного сталеплавильного производства. Также представленные 12 ошибочных или неверных мероприятий могут быть причинами не получения стали раскисленной алюминием с содержанием общего кислорода менее 0,0015 мас. %.

Другой пример от компании СМС [114]. Представлена комплексная концепция получения «чистой стали», состоящая из следующих основных пунктов:

- автоматизация мониторинга и контроля технологии (технологический журнал «чистой стали» по отдельным ключевым технологическим параметрам);

- бесплаковый выпуск плавки в ковш и защита струи в среде инертного газа;
- свод У КП с подачей инертного газа для осуществления процесса внепечной обработки стали в среде инертного газа во избежание насыщения от кислорода и азота;
- вакуумирование стали;
- система мониторинга температуры металла в цехе;
- продолжительность внепечной обработки не менее 50 мин с тремя режимами продувки расплава (высокий, средний и низкий).

Важность представленных пунктов состоит в том, что имеет особое место мониторинга и контроля технологии «чистая сталь» с применением средств автоматизации. Также концепция производства «чистой стали» от немецкой машиностроительной компании СМС охватывает то, что ранее было рассмотрено в обзоре выше.

В рассматриваемых работах часто решалась важная задача оценки поступления кислорода в расплав во время производства стали – процесс вторичного окисления металла. В работе [127] с применением программного комплекса «ГИББС» было установлено, что на внепечной обработке стали возможно поступление кислорода от 0,8 до 4,5 кг/т в расплав, а на выпуске из сталеплавильного агрегата от 1,3 до 5,2 кг/т.

В 70-х годах прошлого века был выдвинут ряд мероприятий, которые в значительной степени позволяют устранить или ограничить образование включений, оказывающих нежелательное влияние на свойства и качество стали [10]:

1. По возможности не применять в качестве раскислителей химически активных элементов таких как алюминий, титан и др. В случае использования этих элементов следует осуществлять тщательный контроль за количеством добавок, способом их введения в жидкий металл и др.

2. Применять огнеупоры, устойчивые против химической и механической коррозии.

3. Применять возможные меры для предотвращения окисления жидкой стали атмосферой воздуха в процессе выпуска и разлива.

4. Использовать методы внепечной вакуумной обработки стали.

5. Для ускорения всплывания и удаления включений проводить продувку жидкой стали нейтральным газом, обработку синтетическими шлаками и др.

Все что представлено в этих пунктах актуально и в настоящее время, но появились дополнительные уточняющие элементы в технологии – это модифицирующая обработка металла кальцием для успешной разлива на УНРС и низкая концентрация серы в металле (менее 0,0030 мас. % или ниже 30 ppm). Можно также отметить, что уровень и развитие технологии производства стали с низкой концентрацией неметаллических включений в современной металлургии стал значительно выше.

В настоящее время большинство качественных сталей раскисляют алюминием [7, 83, 102], который не только технологичен как раскислитель, но и является действенным модификатором, обеспечивающим получение более плотной структуры с заданным мелким зерном и хорошие показатели пластичности и вязкости. Обычно подачу алюминия рассчитывают так, чтобы в жидкой стали присутствовало определённое остаточное его количество. Однако продуктом раскисления стали алюминием является глинозём (Al_2O_3), который вызывает резкое ухудшение её жидкотекучести и затягивание каналов разливочных стаканов. Обработка стали, раскисленной алюминием, кальцийсодержащей проволокой, позволяет устранить эти нежелательные эффекты [75, 83]. Добавление кальция в жидкую сталь – это современная технология, применяемая на многих сталеплавильных заводах. Добавлять кальций в сталь начали давно [43], однако широкое распространение данная технология получила в 1960-е годы после изобретения улучшенных методов добавления и комплексных кальцийсодержащих сплавов. Влияние кальция при производстве стали изучалось с разной степенью тщательности с начала 70-х годов XX века.

На некоторых заводах вследствие несовершенства технологии раскисления содержание общего алюминия при производстве однотипных сталей может коле-

баться в значительных пределах: от тысячных до сотых долей процента. В проведенных многочисленных исследованиях [91] установлено, что крупные первичные включения продуктов раскисления, содержащие до 97 мас. % Al_2O_3 , удаляются из жидкой стали в течение первых 2-3 минут, что приводит к удалению из стали до 80 % кислорода. После интенсивного удаления крупных включений, количество которых связано с окисленностью металла, в расплаве остаются диспергированные, относительно мелкие включения глинозёма, количество которых мало зависит от исходного количества кислорода и остаточного алюминия.

Основное влияние на качество литой заготовки оказывает оксид алюминия. Частицы Al_2O_3 , которые не перешли в ковше в шлак, попадают вместе с жидкой сталью в промежуточный ковш и в кристаллизатор. Частичный переход глинозёма в шлак возможен также в промежуточном ковше. В кристаллизаторе вследствие высокой скорости разливки на сортовых или на тонкослябовых УНРС и короткого времени выдержки (быстрое затвердевание) переход оксида алюминия в шлак незначительный. Осаждение Al_2O_3 на разливочных стаканах может привести к ухудшению разливаемости стали вплоть до прерывания разливки на УНРС (затягивание металлопроводки с остановкой разливки на ручье или прорывы кристаллизующейся корочки металла под кристаллизатором).

В металлургической практике существуют различные методы удаления неметаллических включений из стали:

1) Отстаивание – процесс естественного всплытия включений за счёт меньшей их плотности по сравнению с плотностью стали. В дальнейшем всплывшие включения ассимилируются шлаком. При современных скоростях металлургических процессов нет возможности надеяться только на процесс отстаивания из-за растянутости его во времени.

2) Применение комплексных раскислителей. Очень часто с целью получения в металле легкоплавких и легко коагулирующих, более крупных и вследствие этого хорошо всплывающих комплексов, применяют комплексные раскислители, представляющие собой сплав нескольких раскислителей: силикомарганец, силикокальций и др.

3) Продувка металла инертными газами ускоряет процесс укрупнения включений и их доставки к границе раздела металл-шлак.

4) Обработка металла на выпуске синтетическими шлаками. Шлак на основе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ позволяет неметаллическим включениям ассимилироваться в шлак. Эффективность обработки стали синтетическим шлаком во многом определяется свойствами самого шлака, к числу которых в первую очередь следует отнести температуру его плавления и вязкость, а также межфазное натяжение на границе с металлом [13, 118].

5) Обработка стали покровными шлаками, в течение которой происходит ассимиляция включений в шлаковую фазу. Это пункт продолжения пункта 4, так как процесс обработки синтетическими шлаками будет продолжаться в процессе внепечной обработки и в процессе корректировки химического состава шлака в сталеразливочном ковше. Химический состав шлака значительно влияет на усвоение неметаллических включений [16].

б) Защита стали от вторичного окисления, которое способствует образованию вторичных, третичных (кристаллизационных) и послекристаллизационных включений.

Пути совершенствования технологии производства «чистой стали», связанной со снижением содержания в металле включений на заводах направлено на следующее:

- стабилизация содержания углерода в жидком полупродукте в заданных пределах является основным мероприятием по снижению окисленности металла и исключению загрязнения стали неметаллическими включениями;

- применение высококачественных раскислителей без цветных примесей и имеющих лучшую раскислительную способность (замена алюминия вторичного на первичный);

- использование алюминиевой катанки, вводимой в сталеразливочный ковш при внепечной корректировке содержания алюминия вместо чушкового алюминия;

- внедрение специализированных донных фурм многоканального типа.

При этом мероприятия на промежуточном ковше и в кристаллизаторе считаются малоэффективными и на них не обращают надлежащего внимания или эти мероприятия не развиваются на должном уровне. Но также не исключаются из внимания попытки улучшить чистоту стали по неметаллическим включениям за счёт мероприятий по футеровке промежуточного ковша УНРС. Например, в работе [89] с целью снижения загрязнённости металла алюмосиликатными включениями и увеличения стойкости промежуточного ковша на заводе была освоена технология торкретирования рабочего слоя промежуточного ковша периклазовой торкрет-массой. Результаты металлографических исследований подтвердили снижение содержания хрупких алюмосиликатов и точечных оксидов в 1,7-2,0 раза. Так, максимальный балл хрупких силикатов был снижен с 3-4 баллов до 1-2 баллов, точечных оксидов с 1-2 до 0-1 балла.

На НТМК для наиболее полного удаления комплексных соединений глинозёма в шлак при окончательном раскислении рекомендуется проводить продувку металла аргоном не менее 3 минут как после ввода алюминия, так и после ввода кальция [90].

Отмечены [131] следующие направления по совершенствованию и развитию сталеплавильных технологий с целью повышения технологических свойств, пластичности, вязкости, хладостойкости, прочности, стойкости против общей коррозии и других характеристик с учётом технико-экономических показателей:

- снижение содержания в стали кислорода (не более 20 ppm), серы (не более 30 ppm), водорода (не более 2 ppm), азота (не более 20 ppm), фосфора (не более 60-70 ppm), кремния, меди, олова и других примесей;

- повышение точности достижения заданного химического состава стали (сужение допустимых интервалов содержания элементов) для обеспечения высокого комплекса механических свойств, в том числе прочности и пластичности;

- повышение производительности и снижение материальных и энергетических затрат;

- разработка методов управления составом и количеством неметаллических включений.

В настоящее время, многие предприятия сталкиваются с загрязненностью стали именно алюминатами [134]. Для улучшения качества металла по чистоте применяются различные методы борьбы с неметаллическими включениями, но многие из них требуют повышение производственных затрат и при уменьшении загрязненности металла включениями увеличивают стоимость его производства. Для достижения высоких результатов по чистоте металла необходимо решить ряд организационных вопросов, которые к сожалению, могут быть решающими нежели наличие разработанных технологических приёмов для производства «чистой стали» [134].

Кроме выдержки отношения $[Ca]/[Al] \geq 0,05$ необходимо обеспечивать основные условия наиболее полной модификации твёрдых включений глинозёма:

- продувка металла аргоном до и после обработки кальцием, при этом важным является интенсивность и продолжительность;
- добавка кальция строго в соответствии с содержанием активного кислорода и серы в стали и состава наведённого ковшевого шлака;
- устранение возможности вторичного окисления при разливке металла на УНРС.

Необходим универсальный подход разработки и корректировки технологии получения «чистой стали», но его нет. Технология должна быть применена и масштабируема на любом предприятии. Как показывает литературный обзор.

Лейтс А.В. [32] сводит к тому, что защитное покрытие в ковшах предназначено для уменьшения тепловых потерь металла, исключения его контакта с воздухом и ассимиляции всплывающих включений, и оно должно быть инертным к огнеупорам, но не должно захватываться потоками металла в кристаллизатор. Но ни где не обозначено об инертности к металлу и возможным протекающим химическим реакциям между материалом покрытия и самим расплавом металла, а также динамическим процессам, протекающим в шлаке за период разливки всей серии плавов на УНРС.

Авторы работы [181] указывали, что неудовлетворительный состав защитного покрытия в промежуточном и сталеразливочном ковшах приводит к ухудшению качества отливаемых заготовок из-за загрязнения металла включениями.

Чаще всего для тепловой защиты применяются материалы на силикатной основе, в состав которых входит SiO_2 от 60 до 95 мас. % [247]. Материал на основе SiO_2 растворяется в большом объёме шлака и снижает его основность, что в итоге приводит к восстановлению серы и фосфора из соединений и переходу их обратно из шлака в металл [32].

Защита струи металла погружными стаканами и защитными трубами в сочетании с защитой зеркала его в промежуточных ковшах и кристаллизаторах шлаками занимает ведущее место в производстве высококачественной стали [32].

Ранее в монографии [32] было отмечено, что промежуточный ковш сам может стать источником увеличения загрязнения металла крупными включениями, если зеркало металла в нём не защищено шлаковым покрытием, которое изолирует металл от взаимодействия с воздухом и ассимилирует включения. Также, если дизайн промежуточного ковша выбран недостаточно удачно, то всплывшие крупные неметаллические включения могут вновь загрязнять разливаемый металл и попадать в кристаллизатор. Низкое качество огнеупоров промежуточного ковша может быть дополнительной причиной загрязнения разливаемого металла.

К чистоте металла, поступающего в кристаллизатор УНРС, обычно предъявляются более жёсткие требования, чем при разливке в изложницу. Для сохранения чистоты стали по неметаллическим включениям металл требуется изолировать от воздуха на всём пути от сталеразливочного ковша до кристаллизатора и создать благоприятные условия для всплывания и ассимиляции включений в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

По мнению автора монографии [32], все известные составы смесей для защиты металла в промежуточном ковше далеки от совершенства, если их применяют в условиях длительной разливки по способу «плавка на плавку». Это объяснялось следующим. Защитное покрытие в промежуточных ковшах не обновляется в течение длительного времени. Вследствие ассимиляции неметаллических вклю-

чений в процессе разливки шлаковый расплав существенно изменяет свои физические свойства. Продолжительность его пребывания может достигать 6-8 часов (и более, зависит от количества плавов в серию) при разливке плавов по способу «плавка на плавку».

В работе [186] было отмечено, что основность промышленных ШОС для промежуточного ковша изменяется в широких пределах: от 0,6 до 12, содержание углерода от 0,2 до 20 мас. %, Al_2O_3 – от 3 до 30 мас. %. Основными требованиями, предъявляемыми к шлаковому покрытию в промежуточном ковше, являются: низкая теплопроводность, низкая газопроницаемость и сохранение ассимилирующей способности по отношению к ряду оксидов, находящихся в металле промежуточного ковша, в течение длительной разливки, без обновления шлака. Газопроницаемость шлакового покрытия, влияющая на степень вторичного окисления металла в промежуточном ковше со стороны зеркала, определяется соотношением жидкого и нерасплавленного слоёв, наличием в шлаке оксидов металлов переменной валентности, а также вязкостью жидкого слоя шлака: чем больше толщина жидкого слоя и его вязкость, и чем меньше содержание оксидов железа и марганца, тем ниже степень вторичного окисления металла. Был изучен механизм изменения состава шлака на протяжении всей кампании промежуточного ковша, качественно и количественно определен вклад таких факторов, как эрозия футеровки, попадание шлака и шиберной засыпки из сталеразливочного ковша, а также поглощение всплывающих из стали неметаллических включений. Кроме этого, установлено, что схема подачи ассимилирующей смеси в промежуточный ковш оказывает существенное влияние на изменение химического состава шлакового расплава и его физических свойств на протяжении разливки серии плавов.

Зарубежный опыт развития «чистой стали»

В течении многих лет внепечная обработка на УКП и вакууматоре была одной из ключевых и приоритетных областей исследования [176]. Тогда и сейчас считалось, что «чистая сталь» относится только к сталеразливочному ковшу. Но есть промежуточный ковш, который также ухудшает качество металла.

Основные направления работы на внепечной обработке стали [176]:

1. Технология выпуска плавки и уровень растворенного кислорода в жидком полупродукте;
2. Химический состав шлака в сталеразливочном ковше (основность, Al_2O_3 , сумма $FeO+MnO$, MgO и др.);
3. Огнеупоры сталеразливочного ковша (зона шлака и стали);
4. Технология раскисления металла и шлака;
5. Последовательность и моменты ввода в металл ферросплавов и других сыпучих материалов в ковш;
6. Химический и электрический нагрев стали в сталеразливочном ковше;
7. Расположение и количество продувочных фурм в сталеразливочном ковше;
8. Различные механизмы и практики перемешивания металла для различных этапов обработки расплава;
9. Эволюция включений по составу, размеру и количеству во время обработки металла в сталеразливочном ковше (УКП и ВД);
10. Процесс десульфурации и уровень серы в металле (особое внимание на процесс попадания печного или конвертерного шлака в сталеразливочный ковш, состояние футеровки ковша и химический состав шлака);
11. Модифицирование металла кальцием (неметаллические включения системы $CaO-Al_2O_3-CaS$).

Все попытки сделать «чистую сталь» в сталеразливочном ковше могут быть сведены к минимуму из-за проблем перелива металла в промежуточный ковш. Поэтому первостепенная задача – это исключения вторичного окисления металла раскисленного алюминием и особенно для металла, модифицированного кальцием.

Мелкие включения менее 10 мкм не влияют на качество конечной продукции. Но с другой стороны эти включения могут укрупняться до размеров экзогенного масштаба.

С учётом мирового опыта финансирования в области развития и совершенствования внепечной обработки стали, а также текущих решаемых задач за по-

следние 25 лет была сформирована общая дорожная карта производства «чистой стали» ведущими мировыми научными исследовательскими сообществами и институтами [249]: VDEh-Betriebsforschungsinstitut – BFI (Германия); Materials Processing Institute – MPI (Англия); Centre de Recherches Metallurgiques ASBL – CRM (Бельгия); Swerea MEFOS (Швеция); Rina Consulting - Centro Sviluppo Materiali – CSM (Италия).

В дорожную карту входят следующие направления работы:

- новые марки стали с трудносочетаемыми физико-химическими свойствами и низкой концентрацией углерода, серы;
- жесткое регулирование температуры для снижения потребления электроэнергии и улучшения свойств стали;
- высокие требования к чистоте стали по неметаллическим включениям (производство «чистой стали»);
- снижение качества материалов и сырья (высокая концентрация цветных примесей в ломе);
- необходимость снижения себестоимости и издержек производства стали из-за низкой ценовой маржи;
- необходимость повышения энергетической и материальной эффективности для снижения затрат энергии и материалов.

Были определены основные шесть задач по внепечной обработке стали для её производства с низкой концентрацией включений [249]:

1. Определение химического состава и температуры стали в процессе производства.
2. Процессный анализ, контроль количества и химического состава шлака в сталеразливочном ковше (в режиме реального времени на производстве).
3. Улучшенный контроль массы неметаллических включений, химического состава и распределение по размерам в стали.
4. Управление технологическим процессом на основе самоадаптивных моделей и интеллектуальных датчиков.

5. Увеличенный огнеупорный ресурс ковшей и металлургических агрегатов с меньшим воздействием на качество стали.

6. Подходы индустрии 4.0 для интеллектуального производства (большие данные и аналитика данных, прогнозная аналитика, промышленные роботы, моделирование технологических процессов, Интернет вещей, искусственный интеллект и машинное обучение, промышленные дроны, хранение данных в облаках и др.).

Из представленных решаемых задач у зарубежных коллег видно, что имеет место быть схожим задачам в отечественной практике, но имеется отличие в подходе и сложности достижения чистоты стали с применением лучших доступных технологий. Таким образом, следует в отечественной практике обратить внимание на такой вызов для исключения отставания в развитии технологии получения высококачественной стали.

Исходя из данного литературного обзора были выбраны следующие направления работ для формулировок задач диссертационного исследования:

- контроль и оценка содержания неметаллических включений;
- подбор огнеупоров;
- оценка вторичного окисления металла;
- защита металла от вторичного окисления во время разливки;
- мониторинг и контроль футеровки сталеразливочных ковшей;
- вычислительные программы и металлургические модели на основе математического и термодинамического аппаратов;
- формирование косвенных дефектов из-за включений (продольных трещин и поперечных трещин, плены, трещины по следу качания, захвата шлака в корочку слитка из-за нестабильности работы ШОС в кристаллизаторе по причине включений в стали);
- разработка рекомендаций по технологии «чистая сталь» для промышленного применения и внедрения;

- рассмотрение вопроса качества металла в промежуточном ковше с учётом в нём шлака и выбор шлакового режима (выбор ШОС для промежуточного ковша) и типа футеровки промежуточного ковша;
- корректировка состава шлака в сталеразливочном ковше;
- эффективность отсечки ковшевого шлака на УНРС;
- выбор ШОС для кристаллизатора.

Выводы по главе 1

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы и 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.

1. Допускаемая загрязненность включениями непрерывнолитых заготовок определяется их назначением и особенностями будущего передела. В зависимости от назначения чистого металла содержание неметаллических включений ограничивается через размер включений не более 40 мкм, а в некоторых случаях 10 мкм и содержание в металле газов: кислорода не более 0,0010, 0,0015 и 0,0020 мас. %, азота не более 0,0030, 0,0040 и 0,0050 мас. % и водорода не более 0,0002 мас. %. Для полной классификации чистоты стали необходимо учитывать содержание серы и фосфора с максимальным ограничением 0,0005 и 0,0030 мас. % соответственно. В общем понятии чистоты стали следует опираться на содержание в ней следующих примесей и газов: $[O]_{\text{общ}}$, $[H]$, $[N]$, $[S]$ и $[P]$, а также объемной доли включений.

2. Характер включений зависит от степени раскисленности жидкой стали: их образование связано с эрозией огнеупоров, применяемых при разливке, с реакциями раскисления алюминием и кремнием, или они являются продуктами взаимодействия раскислителей с включениями. В зависимости от состава экзогенные включения подразделяются на четыре категории: результат вторичного окисления металла; огнеупоры сталеразливочного или промежуточного ковшей; шлак сталеразливочного или промежуточного ковшей; эрозия огнеупоров.

3. В литературном обзоре представлены следующие основные мероприятия для производства «чистой стали» с низким содержанием неметаллических включений и газов: применение инертной атмосферы, шлак и огнеупоры должны иметь низкий кислородный потенциал с достаточно хорошим перемешиванием расплава со шлаком. Данных мероприятий недостаточно для разливки металла на УНРС без затягивания разливочных стаканов тугоплавкими включениями, поэтому была поставлена следующая задача. Разработка мероприятий, снижающих случаи «смывов» тугоплавких неметаллических включений с разливочного стакана промежуточного ковша в тело слитка.

4. Необходимо выделить мероприятия, направленные на снижение содержания в металле неметаллических включений на разливке стали и стабильности температуры разливаемого металла, что может также улучшить чистоту стали по экзогенным включениям. Это говорит о том, что необходимо решить задачу по поддержанию температуры металла в промежуточном ковше в заданном узком диапазоне с применением современных доступных технологий.

5. Оптимальный процесс раскисления стали решен и известен, необходимо стремиться применять успешные практики раскисления металла для получения «чистой стали», а именно выполнять раскисление алюминием и не исключать его. Для реализации такой концепции необходимо решать задачи исключения поступления кислорода в металл в период разливки.

6. Общий принцип технологии «чистая сталь» – это ужесточенный контроль технологического процесса и непрерывного мониторинга ключевых технологических параметров на производстве (содержание растворенного кислорода в распла-

ве, расход материалов и энергоносителей, временные технологические параметры и пр.). В современном сталеплавильном цехе такой контроль обычно осуществляют за счёт применения автоматических средств мониторинга технологии и статистических средств обработки информации. Кроме этого, имеется потребность в решении задачи по созданию нового метода 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 в условиях современного сталеплавильного цеха.

7. Несмотря на то, что в металлургии успешно решены задачи по разливаемости стали, раскисленной алюминием, а также по получению ультранизкой концентрации серы (менее 0,0030 мас. %), имеется потребность в решении задачи по разработке и внедрению алгоритма корректировки технологии производства высококачественной стали, связанной 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.

8. Отсутствие общей концепции получения «чистой стали» и учёт всех происходящих процессов в единой технологической цепочке «выплавка-выпуск плавки-внепечная обработка-разливка стали», приводят к ошибочным действиям по себестоимости стали или производительности цеха. Поэтому следует решить задачу по разработке комплекса технологических мероприятий производства «чистой стали» на всей производственной цепочке: от выплавки до кристаллизации металла.

9. Следует учитывать совместимость огнеупоров и шлака при выборе типа футеровки в зависимости от главного оксида в шлаке. Наиболее универсальный материал для всех типов металлургических шлаков – это периклазоуглеродистые

огнеупоры (MgO-C) или оксид магния (MgO). Имеется необходимость решить задачу по определению степени влияния на чистоту стали физико-химических свойств огнеупорных материалов, применяемых в промежуточных ковшах.

10. Пути совершенствования технологии получения «чистой стали» на производстве имеют различные направления и мероприятия. Стабилизация содержания углерода в жидком полупродукте (снижение окисленности металла); применение высококачественных раскислителей; использование алюминиевой катанки вместо чушкового алюминия на выпечной обработке стали; внедрение специализированных донных фурм многоканального типа; выдержка отношение $[Ca]/[Al] \geq 0,05$; продувка металла аргоном до и после обработки кальцием (с определенной интенсивностью и продолжительностью); добавка кальция строго в соответствии с содержанием активного кислорода и серы в стали и состава наведённого ковшевого шлака; устранение возможности вторичного окисления при разливке металла на УНРС. Чаще всего мероприятия на промежуточном ковше и в кристаллизаторе считаются малоэффективными и не берутся в учёт.

11. В настоящее время, на выявленных проблемах производства «чистой стали», вопросы по выбору оптимального ШОС для кристаллизатора УНРС решаться не могут. В таком случае путь совершенствования технологии производства «чистой стали» может быть продолжительным и экономически нецелесообразным.

12. Представлены различные причины образования неметаллических включений, которые связаны не только с оборудованием и технологией, но и с организацией производства. Также отмечено значительное влияние этих мероприятий на увеличение себестоимости стали. Таким образом, следует решить задачу по разработке сквозной технологии на базе комплекса предложенных мероприятий производства «чистой стали».

На основе материалов исследований автора, приведенных в главе 1, сформулированы цель и задачи настоящего диссертационного исследования, представленные во Введении.

ГЛАВА 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА «ЧИСТОЙ СТАЛИ»

2.1 Обзор вычислительной термодинамики

Классификация объектов моделирования

Металлургическое производство рассматривается как сложная большая иерархическая (многоуровневая) система [259]. При решении задач организации производства для металлургического предприятия представляется в виде пятиуровневой системы [28]: 1-ый уровень – элементы системы (агрегаты, установки, транспортные единицы и др.); 2-ой уровень – подсистемы (технологические линии, транспортные направления, хранения и передачи информации и др.); 3-ий уровень – объединяются элементы и подсистемы в участки (технологические участки, транспортные участки цехов, цеховые подсистемы автоматизированного управления); 4-ый уровень – цеха (объединяющие участки) или самостоятельные подразделения обеспечения и управления, склады, автоматизированная система управления; 5-ый уровень – система в целом – предприятие.

Свойства металлургических подсистем нельзя изучить или описать, зная только свойства отдельных агрегатов (элементов). Необходимо знать связи между элементами или структуру системы.

Например, при управлении цехом в координатах производительность – качество – себестоимость часто приходится решать конфликтные ситуации. Исходя из рассмотрения системы можно выбрать сбалансированное, оптимальное или более лучшее решение в текущей ситуации и на конкретном предприятии.

По данным [33] ниже представлена классификация объектов моделирования, разработанная в соответствии с их попарно противоположными свойствами, влияющими на выбор методов моделирования и соответствующего математического аппарата.

Классы объектов моделирования в зависимости от внутренних свойств объекта бывают следующими: непрерывные, дискретные, стационарные, нестационарные.

нарные, с сосредоточенными параметрами, с распределенными параметрами, одномерные, многомерные. Подавляющее большинство металлургических объектов, состояние которых характеризуется макроскопическими физическими величинами (температура, давление, масса и т.п.), обладает свойствами непрерывности и многие агрегаты носят дискретную работу (дуговая сталеплавильная печь, конвертер и др.).

Классы объектов моделирования в зависимости от внутренних свойств объекта и задач разделяются на: детерминированные, стохастические (случайные), динамические, статистические, линейные, нелинейные. Для реальных металлургических объектов чаще используют детерминированные и нелинейные, а также могут применяться стохастические и динамические. Определение «детерминированные» означает лишь тот факт, что по условиям решаемой задачи и применительно к свойствам конкретного объекта случайными факторами в данном конкретном случае можно пренебречь. Для всех реально существующих объектов присуще свойство стохастичности. И весьма вероятно, что при другой постановке задачи «детерминированный» объект придется рассматривать как стохастический. В основе формализованного исследования и описания стохастических объектов лежат методы теории вероятностей, математической статистики, теории случайных процессов. К динамическим объектам также можно отнести термодинамические явления (диффузия, химические реакции), которые присущи для металлургических процессов.

Классы объектов моделирования в зависимости от метода исследования подразделяются на: аналитические, идентифицируемые, смешанные. Деление объектов моделирования и моделей на аналитические, основанные на ранее изученных и описанных в математической форме закономерностях объекта, и идентифицируемые, которые строятся на основе специального экспериментального исследования, связанного главным образом со степенью сложности и изученности объекта.

Реальные металлургические объекты, как правило, являются, сложными динамическими и нелинейным объектами. Физико-химическая сложность металлургических процессов приводит к многосвязности объектов.

Создание программ для пирометаллургических процессов

В металлургии имеет место быть тому, что технолог или инженер-металлург металлургического предприятия должен иметь специальные вычислительные средства, которые позволяли бы ему оперативно решать производственные задачи. Например, оценить изменения поведения компонентов ванны металла и шлака вследствие замены одного материала на другой, или изменить режим раскисления стали и оценить, как изменится при этом состав и количество неметаллических включений; определить количество попавшего в ковш сталеплавильного шлака, который изменил химический состав ковшевого шлака; как влияет динамическое изменение шлака в промежуточном ковше во время серийной разливки на установке непрерывной разливки стали (УНРС) на работу шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе. Таких задач в практике сталеплавильного производства возникает множество.

Как правило, решение подобных задач можно осуществить с помощью проведения опытных промышленных плавов или расчётным путём с использованием термодинамического равновесия «металл-шлак-газ» и материального баланса. В первом случае, технолог отрабатывает всевозможные варианты и выбирает оптимальный (лучший). В лучшем случае для решения конкретной задачи прибегает к анализу предыдущего опыта и по аналогии производит расчёт по некоторой идеальной схеме. Это не очень удобно и ошибка такого подхода может быть достаточно большой. Во втором случае, применение современных вычислительных программ с целью термодинамического моделирования сталеплавильных процессов способствует пониманию этих процессов, происходящих в металлургическом агрегате, позволяет разрабатывать оптимальные маршруты, для известных технологических процессов и существенно сократить время внедрения и отработки новых технологий, и за счёт этого повысить эффективность металлургического производства. Применение этого подхода позволяет исследователю проводить ком-

плексный анализ производства стали, определять верные технологические решения, отсеивать ошибочные, а также давать простые экономические оценки принимаемых решений.

Кроме этих двух случаев в настоящее время стал актуален и новый, третий – это выполнение расчётов в режиме реального времени на производстве или другими словами «непрерывный мониторинг». На протяжении многих десятилетий стратегии контроля технологических процессов основывались на образцах, взятых из жидкой стали и шлака, а также из твёрдых продуктов. Другими словами, это статический контроль. В настоящее время благодаря крупным достижениям в области вычислительных моделей, искусственному интеллекту, экспертным системам и технологиям обработки сигналов, все более актуально становится разработка динамических систем на основе диагностических датчиков, которые позволяют в режиме реального времени осуществлять непрерывный мониторинг металлургических операций [122, 196, 230].

В настоящее время решена задача обеспечения металлургических предприятий компьютерами и вычислительными мощностями с необходимыми базами для хранения огромного числа данных. Это является основой для того, чтобы в металлургической практике начали активно применять современное моделирование для повышения эффективности производства и совершенствования металлургических процессов. В современном цифровом мире и информационных технологиях все вопросы в данной области на металлургических заводах кажется, что решены, но на практике это не так. Есть еще много вопросов в части того, какую модель использовать, как выполнить расчёт в условиях множества неопределённостей, которые имеют место быть на заводе и в цехе. Металлургические объекты принадлежат, как было сказано выше, к классу нелинейных объектов, причем нелинейность обуславливается многими причинами, в том числе и нелинейным характером физико-химических процессов [259].

Также следует понимать следующее, что существующие автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) на металлургических предприятиях работают либо на базе статистических моделей, либо на ба-

зе динамических моделей. В случае статистических моделей расчёт металлургических объектов ведётся по балансовым уравнениям на основе данных о составе и количестве материалов, такие модели на практике показывают низкую точность из-за большой variability параметров в ходе плавки. Динамические модели учитывают данные о текущем состоянии металла и вносят корректирующие воздействия в ходе плавки. Применение моделей данного типа затруднено отсутствием качественных данных поступающих от объекта. Скорее всего для получения успеха работы АСУ ТП следует рассматривать одновременное применение статистической и динамической модели.

С другой стороны, многолетняя практика создания и эксплуатации разнообразных автоматизированных, информационно-вычислительных, аналитических, экспертных и иных систем, в основе которых лежат компьютерные технологии, показывает, что далеко не всегда упомянутые системы способствовали существенному улучшению качества организационного управления и достижению целей повышения эффективности деятельности структур, в которых эти системы были внедрены [122, 167].

В случае металлургических процессов, несмотря на высокую их автоматизацию, а также автоматизацию сталеплавильных агрегатов, отсутствуют надежные и адаптированные модели, способные предсказать конечный результат плавки и качество металлопродукции.

Сегодня крайне важно осознать, что причины достижения не слишком удачных результатов внедрения различного рода информационных систем, скрываются не в технических возможностях вычислительных машин (скорости вычисления и объёма обработки данных), а в том, что методы, модели и технологии управления на всех этапах подготовки и принятия решений остались теми же, что были еще в последней четверти прошлого века [260]. Модели, методы и алгоритмы принятия управленческих решений и в том числе в совершенствовании технологии не изменились или изменились крайне незначительно, во многом сохранив необоснованный субъективизм при их принятии.

Промышленные и экспериментальные способы исследования высокотемпературных процессов с физико-химическими превращениями, как правило, дороги, а зачастую вообще не осуществимы. В таких условиях особое значение приобретает выполняемый с использованием компьютера вычислительный эксперимент, который позволяет анализировать состояния и процессы, а также делать выводы о поведении исследуемых объектов на основании модельных представлений. Основным допущением при этом является предположение о существовании в системе локального равновесия, которое даёт возможность проводить расчёты с привлечением математического аппарата равновесной термодинамики [85, 119, 148, 174, 227].

Термодинамика в металлургии

Термодинамическое равновесие – это предельное состояние, к которому стремится термодинамическая система, изолированная от внешних воздействий, [23], то есть в каждой точке системы устанавливаются термическое, механическое и химическое равновесия (происходит выравнивание температуры и давления, и все химические реакции протекают до конца).

Исходя из работ Белова Г.В. [85, 119, 174] и других авторов можно сделать следующий вывод, что математическая задача отыскания равновесного состояния термодинамической системы может быть поставлена и решена. Затруднения состоят в определении теоретических уравнений состояния отдельных фаз. Такие уравнения получены для простых случаев, например, для газовых и конденсированных фаз. В частности, для расплавов существует множество моделей, в рамках которых устанавливаются уравнения состояния.

Модель идеального раствора применима для описания смеси компонентов по физико-химическим свойствам, например, смесь изотопов одного и того же химического элемента, в рамках данной модели объем (V^m) и энтальпия (H^m) равны нулю, $S_i^m = -R \ln x_i$ и $S^m = -R \sum \ln x_i$. Все остальные термодинамические свойства определяются через соотношение, где $a_i = x_i$ [44]:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_i^m = -R \left[T \left(\frac{\partial \ln a_i}{\partial T} \right)_p + \ln a_i \right]; \\ H_i^m = -RT^2 \left(\frac{\partial \ln a_i}{\partial T} \right)_p; \\ G_i^m = H_i^m - TS_i^m = RT \ln a_i; \\ S^m = \sum_{i=1}^k S_i^m x_i; \\ H^m = \sum_{i=1}^k H_i^m x_i; \\ G^m = H^m - TS^m \end{array} \right. \quad (2.1)$$

На практике не существует расплавов, строго следующим законам идеального раствора.

Наиболее популярными являются модели, которые строятся на предположении о известной структуре расплава и характере взаимодействия между его компонентами. Такой подход позволил получить ряд удобных математических моделей для описания термодинамических свойств металлургических расплавов. В таблице 2.1 представлен ряд моделей [44].

Для систематизации теоретического материала, относящегося к металлургическим расчётам, принципиально важными оказались работы Гиббса, интерпретирующие термодинамику как обобщение классической механики на тепловые явления. Именно это позволяет представить практически весь комплекс методов количественного описания явления сталеплавильного процесса, включая и кинетические, в виде компактной системы взаимосогласованных алгоритмов и программ. Метод Гиббса позволяет описывать химические процессы в любых системах без предварительного их представления в виде стехиометрических реакций. Феноменологическая (классическая, формальная, макроскопическая) термодинамика Гиббса даёт как раз тот язык, с помощью которого можно наиболее просто объяснить сущность любой задачи исключительно в терминах, непосредственно измеряемых величин, таких как температура, давление, химический состав, объём, масса и др., то есть величин, которыми руководствуется технолог в своей работе. По своей математической структуре термодинамика Гиббса – это классическая механика (статика сплошных сред) с той разницей, что механика изучает системы, способные обмениваться только работой и веществом, а термодинамиче-

ские системы обмениваются еще и теплом. Для этого в исходные уравнения механики Гиббс вводит дополнительную переменную, характеризующую способность системы отдавать или поглощать тепло – энтропию. То есть, термодинамика приобретает совершенно строгую математическую структуру механики. Термодинамику Гиббса можно рассматривать как обобщение механики на реальные системы, движение которых всегда сопровождается тепловым явлением.

Существующие компьютерные системы управления сталеплавильными агрегатами, даже наиболее совершенные из числа реализованных, практически полностью ориентированы только на исполнение режимов, задаваемых технологами [60]. Физико-химические параметры процесса остаются вне сферы управления и корректировки. Работа таких систем основывается на статистических моделях, синтезируемых путем обработки массивов данных прошлых плавов, или на простом копировании режимов и операций одной из предыдущих плавов, принятой за норму. Для успешной работы подобных систем требуется выполнение весьма жестких условий в отношении качества и стабильности поставок сырья, энергоносителей, работы вспомогательных служб, что достигается только при существовании разветвленной инфраструктуры обеспечивающих производств.

Детерминированная физико-химическая модель плавки, в отличие от статистической, исходит из строгого априорного расчёта, опирающегося на базы фундаментальных законов и констант, поэтому её прогностические возможности неизмеримо шире. Система управления плавкой, построенная на основе детерминированной физико-химической модели, должна в масштабе реального времени генерировать технологические решения, поддерживая работу агрегата в любых «нештатных» ситуациях, совместимых с принципиальной возможностью выполнения задания. Появляется возможность «предсказывать» или прогнозировать планируемые варианты плавки при проектировании новой технологии – функция, принципиально недоступная для статистических моделей.

Таблица 2.1 – Математические модели для описания термодинамических расплавов

№	Название модели, теории и метода	Описание
1	Модель бесконечно разбавленных растворов (БРР)	В разбавленном растворе концентрация растворенного вещества стремится к нулю и взаимодействием между частицами разбавленного вещества можно пренебречь. При концентрации компонентов до 1 мас. %, некоторые металлургические расплавы могут рассматриваться как разбавленные растворы [4]. В рамках модели разбавленных растворов, активности равны концентрациям. Трудность заключается в том, что параметры теории разбавленных растворов, определяются экспериментально (ΔH_i^m). Все остальные свойства – по соотношениям (2.1).
2	Модель регулярных растворов	<p>Образование регулярного раствора, путём смешения чистых компонентов, сопровождается выделением или поглощением теплоты, в отличие от идеального [2, 4, 20, 148]. По формуле ниже определяется концентрационная и температурная зависимость активности i-го компонента многокомпонентного регулярного раствора с произвольным числом компонентов k:</p> $RT \ln \gamma_i = \sum_{j=1}^k Q_{ji} x_j - \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k Q_{ij} x_i x_j,$ <p>где Q_{ij} – коэффициенты, определяемые из массива опытных данных (энергии смешений), общее количество коэффициентов Q_{ij} равно $k(k-1)/2$. Данной формулы с уравнением $S_i^m = -R \ln x_i$ и общими соотношениями (2.1), достаточно для определения всех термодинамических свойств регулярного раствора.</p>
3	Модель атермальных растворов	Атермальные растворы представляют большую группу моделей, в которых предполагается, что теплота смешения компонентов равна нулю как и у модели идеальных растворов, в отличие от которых «неидеальность» проявляется через наличие избыточной энтропии смешения [40].
4	Модель субрегулярных растворов (ТСР)	<p>Из модели регулярных растворов для бинарных растворов следует симметрия интегральных молярных свойств относительно линии $x_1=x_2=0,5$, так как энергия смешения представляется в виде линейной комбинации: $Q = ax_1+bx_2$, где a и b – предельные энтальпии растворения компонентов 2 и 1, а энтропии смешения идеальная, тогда как реальные расплавы характеризуются асимметрией свойств. Модель субрегулярных растворов предполагает наличие в растворе, кроме связей компонентов типа А–В, еще и сочетаний типа А₂В и АВ₂. Согласно работы для данной модели существует выражение коэффициентов активности [43]:</p> $RT \ln \gamma_i = \sum_{j=1}^k \left[\frac{W_{ji} + W_{ij}}{2} + (W_{ji} - W_{ij}) \frac{x_i - x_j}{2} \right] - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left[\frac{W_{ij}}{2} + (W_{ij} - W_{ji}) x_j \right] x_i x_j.$ <p>Коэффициенты W_{ij} определяются по экспериментальным данным для бинарных систем. Модель субрегулярных растворов позволяет описывать системы со знакопеременными отклонениями G^m от значений этой величины для совершенного раствора, например, MeO–SiO₂, обладающих слабыми межчастичными взаимодействиями. В то время как для систем с сильным межчастичным взаимодействием, например, Fe–Si, Co–Si, Ni–Si и др. модель дает большие погрешности.</p>
5	Модель квазирегулярных растворов	Согласно формулам модели регулярных растворов, энергия смешения составляет $G^e = Q_{12} x_1 x_2$. Однако в ряде экспериментов значения G^e по модулю оказываются меньше вычисленных по этой формуле. Для достижения согласия с экспериментом было предложено величину G^e рассчитывать по формуле: $G^e = (Q_{12} - aT) x_1 x_2$, пологая тем самым линейную зависимость энергии от смешения от температуры [22]. Модель субрегулярных растворов представляет экспериментально определяемый ряд по концентрации, а теория квазирегулярных растворов – экспериментально определяемый ряд по концентрации и температуре.
6	Квазихимическая модель растворов	<p>Квазихимическая модель растворов рассматривает равновесия «реакции» образования связей А–В из одноименных А–А и В–В, что приводит к следующей зависимости энтальпии смешения: $H^m = 2Q_{12} x_1 x_2 / (1 + !)$, где $! = \left[1 + 4x_1 x_2 \left(\exp \frac{2Q_{12}}{zRT} - 1 \right) \right]^2$.</p> <p>Большим преимуществом квазихимической модели является то, что в её формулы входят только параметры бинарных взаимодействий (энергия смешения – Q_{12}), которые могут быть получены из простых экспериментов. Практика показала, что модель применима лишь для некоторых простых систем и на её основе возможны, как правило, заключения только качественного характера [44].</p>

№	Название модели, теории и метода	Описание
7	Квазикристаллическая модель	<p>В рамках квазикристаллической модели предполагается, что металлы образуют с растворителем раствор замещения, а неметаллы – раствор внедрения, то есть раствор имеет «квазикристаллическую» структуру. Общая энергия такого раствора определяется совокупной энергией парных взаимодействий и не зависит от состава и температуры [44]:</p> $RT \ln f_i = \frac{2 \sum_{i=2}^k x_i E_{il}}{1 - \sum_{i=2}^k x_i} - RT \ln \left(1 - 2 \sum_{i=2}^k x_i \right)$ <p>Где E_{il} – энергии парных взаимодействий (устанавливается из практики). Несмотря на то, что квазикристаллическая модель удовлетворительно описывает растворы неметаллов в железе, при больших концентрациях примесей данная модель даёт большие отклонения расчётных от опытных данных.</p>
8	Модель раствора как фазы, имеющей коллективную электронную систему (МКЭ)	<p>Энтропию любой фазы расплава можно представить в виде суммы электронной и ядерной составляющих: $S = S_{яд} + S_{эл}$. При этом химический потенциал, характеризующий скорость изменения по концентрации энергии Гиббса определяется как:</p> $\mu_i = \frac{\partial G}{\partial n_i} = \bar{H}_i - T \bar{S}_{i,яд} - T \left(\frac{\partial S_{i,эл}}{\partial n_i} \right)_{P,T,n_i}$ <p>Последний член в выражении может быть представлен в виде:</p> $-T \frac{\partial S_{i,эл}}{\partial n_i} = -T \left(\frac{\partial S_{i,эл}}{\partial n_e} \right)_{P,T,n_j} \left(\frac{\partial n_e}{\partial n_i} \right)_{P,T,n_j} = \mu \varepsilon_i,$ <p>где μ – парциальная свободная энергия электронов (уровень Ферми); ε_i – валентность или, точнее, степень окисления элемента i в фазе (среднее число электронов отдаваемое атомом i при введении его в фазу):</p> $\varepsilon_i = \frac{\partial n_e}{\partial n_i} = Z_i = \frac{1}{n} \int_0^\infty N_i(E) f(E) dE,$ <p>где Z_i – полное число электронов в свободном атоме i; $N_i(E)$ – плотность состояний, связанных с атомами сорта i в фазе; $f(E)$ – функция Ферми-Дирака [44]. Выражение для химического потенциал элемента в оксидной фазе $\mu_{(i)}$ имеет вид:</p> $\mu_{(i)} = \mu_{(i)}^0 + RT \ln x_{(i)} \gamma_{(i)} + \varepsilon_i \mu_i.$ <p>Величина коэффициента активности $\gamma_{(i)}$ определяется выражением:</p> $\ln \gamma_{(i)} = -\frac{k_i}{RT} - \frac{\Pi}{RT} \ln \frac{\Pi}{e k_i} - \ln \sum_{j=1}^k \frac{x_{(j)} e_{ij}}{\sum_{m=1}^k x_{(m)} e_{mj}} + 1,$ <p>где x_i – мольная доля; k – число атомов разного сорта;</p> $\Pi = \prod_{i=1}^k k_i^{x_{(i)}}$ <p>$e_{ij} = \exp(-\varepsilon / RT)$ – фактор Больцмана; $\varepsilon_{ij} = (\sqrt{k_i} - \sqrt{k_j})^2$ – энергия смешения; k_i – параметр модели, атомный потенциал. В модели раствора, как фазы имеющей коллективную электронную систему, в качестве компонентов используются элементы Периодической системы Д.И. Менделеева, что резко упрощает описательную задачу и не требует предположений о наличии химических соединений и реакций, протекающих в расплаве. Условием достижения термодинамического равновесия, является равенство химических потенциалов: $\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta = \mu_i^\gamma \dots, i = \overline{1, k}$.</p>
9	Метод параметров взаимодействия Вагнера	<p>Идея метода Вагнера заключается в разложении соответствующей парциальной избыточной термодинамической функции смешения ($\Delta G_i^e, \Delta H_i, \Delta S_i^e$) в степенной ряд Тейлора по концентрациям компонентов и обратной температуре около точки, отвечающей чистому растворителю. Если за стандартное состояние принять чистый компонент i, то для избыточной свободной энергии, точнее для $\ln \gamma_i = \Delta G_i^e / RT$ при постоянных температуре и давлении получается следующее выражение:</p> $\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^0 + \sum_{j=2}^n \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial x_j} x_j + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^n \frac{\partial^2 \ln \gamma_i}{\partial x_j^2} x_j^2 + \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \frac{\partial^2 \ln \gamma_i}{\partial x_j \partial x_k} x_j x_k + \dots$ <p>Входящие в уравнение частные производные называют параметрами взаимодействия и обозначают соответственно $\varepsilon_i^j, \rho_i^j$ и $\rho_i^{j,k}$. С учётом этих обозначений выражение преобразуется следующим образом:</p> $\ln f_i = \sum_{j=2}^n e_i^j [j] + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^n r_i^j [j]^2 + \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n r_i^{j,k} [j][k] + \dots,$ <p>где $e_i^j, r_i^j, r_i^{j,k}$ – соответствующие частные производные десятичного логарифма коэффициента активности компонента i по массовым процентным концентрациям остальных растворённых веществ.</p>

№	Название модели, теории и метода	Описание
10	Полимерная модель	<p>В рамках полимерной модели делаются предположения о наличии в расплаве полимерных цепочек анионов. Например, в модели В.К. Новикова [36] при рассмотрении расплава MeO-SiO_2, активности оксидов MeO и SiO_2 определяются по выражениям:</p> $a_{\text{MeO}} = N_1 = \frac{1 - N(3 - \alpha_{2,4})}{1 - N(2 - \alpha_{2,4})}, a_{\text{SiO}_2} = K_n N_2 / N_1^2,$ <p>где N_1, N_2 – ионные доли «свободных» ионов кислорода и мономера MeO и SiO_4^{4-}, соответственно; $\alpha_{2,4}$ – степень полимеризации, учитывающая наличие би- и тетрафункциональных групп в расплаве; N – мольная доля SiO_2.</p> <p>Величина $\alpha_{2,4}$ связана с K_n следующим выражением [145]:</p> $K_n = \frac{\alpha_{2,4}(1 - N(3 - 2\alpha_{2,4}))}{N(1 - \alpha_{2,4})^2},$ $\frac{N_2}{(1 - x)(1 - y)} = 1 - N_1 x, x = K_n \frac{N_2}{N_1}, y = \frac{x^2}{N_2}.$ <p>Зная K_n, можно из этих уравнений определить $\alpha_{2,4}$ и N_2.</p>
11	Квазихимическое приближение в модели строго регулярных растворов	<p>В квазихимическом приближении в модели строго регулярных растворов предполагается равенство энергии взаимодействия катионов сорта i с j ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$).</p> <p>Выражение для коэффициента активности тогда принимает вид:</p> $RT \ln \gamma_i = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{N_r} z(r) \left[2 \ln \frac{X_i(r)}{x_i} + \frac{\varepsilon_{ii}(r)}{RT} \right].$ <p>Где N_r – число рассматриваемых катионных сфер; $z(r)$ – число соседей на расстоянии r; $X_i(r)$ определяется из условия:</p> $X_i(r) \sum_{r=1}^N X_j(r) \exp \frac{\varepsilon_{ij}(r)}{RT} = x_i, i = \overline{1, k}; r = \overline{1, N_r},$ <p>а величины $\varepsilon_{ii}(r)$ удовлетворяют условию</p> $\omega_{ij}(r) = \varepsilon_{ii}(r) + \varepsilon_{jj}(r) - 2\varepsilon_{ij}(r),$ <p>где $\omega_{ij}(r)$ – параметр модели, энергия обмена катионов i и j на расстоянии r.</p>
12	Модель регулярных ионных растворов (ТРИР или теория Кожеурова В.А.)	<p>Модель регулярных ионных растворов пытается учесть существование компонентов расплавов в ионизированном виде. Наиболее распространенной моделью является модель растворов с общим анионом без учета ближнего порядка [4]:</p> $RT \ln \gamma_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^N Q_{li} x_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N Q_{ij} x_i x_j,$ <p>где x_i – ионная доля катионов сорта i; $Q_{ij} = \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji} - \varepsilon_{ii} - \varepsilon_{jj}$ – параметр модели, энергия смешения; ε_{ij} – энергия связей катиона сорта i с ближайшими анионами, когда в следующем за ними катионном слое находятся только катионы сорта j.</p> <p>Учёт ближнего порядка приводит к следующему выражению для коэффициента активности:</p> $RT \ln \gamma_i = \frac{z}{2} \ln \frac{\bar{X}_{ii}}{x_i^2},$ <p>где z – координационное число; \bar{X}_{ii} – среднее число пар частиц сорта i-j, определяемое из системы уравнений:</p> $\bar{X}_{ii} \bar{X}_{jj} = \bar{X}_{ij}^2 \exp \frac{2Q_{ij}}{zRT}, \sum_{j=1}^N \bar{X}_{ij} = x_i, \bar{X}_{ij} = \bar{X}_{ji}.$ <p>Учёт влияния ионов, не являющихся ближайшими соседями в первом приближении (учёт только парных взаимодействий), приводит к аналогичному виду зависимости:</p> $RT \ln \gamma_i = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^2 z(r) \ln \frac{\bar{X}_{ii}(r)}{x_i^2},$ <p>где $z(1)$ и $z(2)$ – координационные числа 1-й и 2-й координационных сфер; величины $\bar{X}_{ii}(r)$ рассчитываются из систем уравнений выше с конкретным значением энергии смешения Q_{ij} [44].</p>

Применение вычислительной термодинамики в металлургической практике позволяет [60, 85, 119, 174]:

- минимизировать расходы шихты, энергоносителей, раскислителей, легирующих, шлакообразующих и других материалов;
- обеспечить лучшее согласование работы технологической цепочки: сталеплавильный агрегат – внепечная обработка стали – УНРС;
- увеличить производительность сталеплавильного цеха;
- уменьшить затраты (от 0,5 до 5 долл. США, зависит от уровня и стабильности текущей технологии для конкретного предприятия) на каждой тонне выплавленного металла при повышении и стабилизации качества производимого металла.

Термодинамическое моделирование является разновидностью математического моделирования. Компонентами термодинамической модели являются: совокупность допущений о физико-химическом характере системы (возможность образования растворов, степень достижения равновесия и т.д.); условия равновесия (сведения об элементном составе и термодинамических параметрах, которые характеризуют равновесное состояние); информация о термодинамических свойствах веществ, которые образуют равновесную систему; физико-химические модели фаз системы (уравнения состояния фаз или функциональные зависимости характеристических функций фаз от состава и термодинамических параметров системы) [119].

Основная задача моделирования термодинамического равновесия заключается в определении фазового и химического состава, а также значений термодинамических параметров исследуемой системы.

Наиболее часто методы равновесной термодинамики применяются в сочетании с так называемой идеальной моделью, в соответствии с которой все растворы являются идеальными, поведение газовой фазы описывается уравнением состояния идеального газа. Однако в ситуации, когда существенную роль играют силы межмолекулярного взаимодействия, например, концентрированные раство-

ры конденсированных веществ, идеальная модель становится непригодной и в качестве примера можно привести металлургические процессы.

Актуальным является создание универсальной математической модели, обеспечивающей возможность её применения при разработке алгоритмов расчёта равновесного состава с использованием целого класса термодинамических моделей, а также реализация указанных алгоритмов в виде программ и программных комплексов.

Особенностью термодинамического моделирования является то, что все модели имеют единую информационную основу, в качестве которой выступают сведения о термодинамических свойствах веществ. Объём исходных данных, которые необходимо подготовить для проведения даже простейших расчётов, довольно велик. При этом малейшая ошибка в данных может полностью обесценить результаты вычислений. Поэтому неотъемлемой частью любой компьютерной программы, предназначенной для термодинамического моделирования, является база данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ.

Современные программные комплексы для расчётов в пирометаллургии

Рассмотрим несколько существующих современных вычислительных комплексов для расчёта термодинамического равновесия, применяемых в пирометаллургии. Среди современных программных комплексов, которые снабжены базой данных по термодинамическим свойствам веществ и предназначены для термодинамического анализа равновесных состояний сложных химически реагирующих систем, из них можно отметить TEPRA, MPE, MTDATA, Thermo-Calc, FactSage, ГИББС [85, 101, 196]. Конечно, это не исчерпывающий список существующих программ в мире для пирометаллургических расчётов, в сети Интернет или в других открытых источниках можно еще найти столько же или больше.

Известная в России программа моделирования равновесия в закрытой системе – TEPRA [48], которая является развитием программы АСТРА [31]. Программа позволяет рассчитывать газовую фазу, в состав которой входят молекулы, атомы, ионы и электронный газ. Учитывается конденсированная фаза, в которую включаются соединения в твёрдом и жидком состояниях. Но, при этом, конденса-

рованная фаза рассматривается как один компонент. Данный программный комплекс не получил широкого применения в современной металлургии, а используется только в научно-исследовательских задачах в лабораториях или в учебных целях.

Пакет MPE (Multicomponent Phase Equilibria) [99] является коммерчески доступным термодинамическим пакетом, разработанный CSIRO (Австралия). Пакет был создан для приложений, связанных с пирометаллургическими процессами чёрных и цветных металлов.

MTDATA [88] – коммерчески доступный термодинамический пакет, разработанный Национальной физической лабораторией (NPL) в Великобритании (Materials Thermochemistry Section at National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.).

Программный комплекс MTDATA для расчёта фазовых равновесий в многофазных многокомпонентных системах, в состав которого входит банк данных, содержащий термодинамические свойства. Программа может выполнять сложное равновесие расчётов до 30 различных компонентов и 500 фаз одновременно. Программный комплекс ориентирован на решение промышленных задач широкого круга, включая задачи преобразования энергии, химии, экологии, тепловой и водной коррозии, покрытий, травления и роста кристаллов.

Thermo-Calc – это коммерчески доступный программный пакет, разработанный в Швеции (г. Стокгольм), свое развитие получил с 1981 г. профессором Королевского Технологического института Бо Сундманом [86, 87, 254]. В Thermo-Calc включены многочисленные модели термодинамических свойств элементов, соединений, фазы твёрдого раствора, жидкость, водные растворы, газовые смеси, полимеры и др. В сочетании с мощным вычислительным механизмом и гибким постпроцессором, Thermo-Calc может выполнять различные расчеты для сплава, содержащий до 40 компонентов.

Thermo-Calc – мощная и гибкая программа, предназначенная для выполнения термодинамических расчётов и построения фазовых диаграмм. При разработке программы особое внимание уделялось возможности исследования термоди-

намических систем с использованием существенно неидеальных систем. Программу можно использовать для анализа термодинамических систем в таких областях, как химия, металлургия, материаловедение, геохимия и т.д. Это программа распространена в современной металлургии как за рубежом, так и в России.

FactSage, проект, основанный в 1976 году, предполагал создание программных средств для работы с термодинамическими данными (пиromеталлургическое применение) и решения задач химии металлов [255]. F*A*C*T-Web (Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics) предоставляет свободный доступ к информации о термодинамических свойствах индивидуальных веществ, химических реакций и возможностям расчёта равновесного состава термодинамических систем. FactSage [146] – это коммерчески доступная программа, которая была представлена в 2001 году как сочетание F A C T / FACT-Win (Thermfact, Канада) и ChemSage (GTT-Technology, Германия) термодинамические упаковки, также это является результатом выполнения совместного проекта между двумя канадскими университетами – Монреальский политехнический институт (Ecole Polytechnique de Montreal) и университет Макгилла (McGill University). Начиная с 2001 года было расширение в сторону различных сплавов. Это программное обеспечение может выполнять сложные расчёты равновесия до 32 элементов, 40 фаз неидеального раствора и более 1500 стехиометрических соединений одновременно. Эта программа распространена в современной металлургии за рубежом.

ГИББС-равновесие. «ГИББС-равновесие» – компьютерная программа, которая позволяет оперативно прогнозировать (моделировать) процесс, протекающий в жидкой стали на основании термодинамических процессах сталеварения [101]. Программа ГИББС-равновесие производит расчёт состава и массы металла, шлака и газовой фазы. Применяется программа ГИББС при разработке металлургических технологий, обеспечивающих получение продуктов заданного качества в необходимом количестве при условии минимальных издержек, при ведении металлургической плавки в консультационном режиме, а в перспективе может быть использован для полной автоматизации работы металлургических агрегатов,

то есть для непрерывного мониторинга (такой вариант не реализован на практике). В настоящее время компьютерная система ГИББС используется в МИСиСе для обучения студентов-металлургов и повышения квалификации персонала металлургических предприятий.

Первоначально было так [41, 60]: в расчётах необходимо использовать не среднестатистические коэффициенты усвоения, которые в действительности зависят от индивидуальных условий каждой плавки, а вычисления путём их совместного решения задачи оптимизации (корректировки) шихты и термодинамического расчёта распределения элементов в системе металл – шлак (упрощенный вид без учёта газовой фазы). Это существенно повышает точность расчёта и эффективность оптимального управления процессом.

Рассматривая систему, состоящую из шлака, металла и газовой фазы, находящуюся в термодинамическом равновесии, то есть систему, в которой произошло выравнивание температуры и давления и всех возможных реакций. Такое допущение можно принять для металлургического процесса, так как он осуществляется при температурах выше 1600 °С и все реакции протекают с большими скоростями (быстрее, чем продолжительность плавки).

В новой улучшенной версии ГИББС-равновесие [101] моделирование происходит в закрытой изобарной, изотермической системе, состоящей из трёх фаз. В металлургических агрегатах происходит перераспределение химических элементов, которое можно описать с помощью простейших реакций и решить термодинамическую задачу равновесия в системе «металл-шлак-газовая фаза» с использованием известных современных теорий металлургических процессов. При этом модель обеспечивает: расчёт активностей компонентов в металле и шлаке; учёт переменной валентности переходных элементов в шлаке (Cr, Ti, V, Fe и др.); учёт внешнего давления в газовой фазе (избыточное давление или вакуум); расчёт температуры процесса; стабильное функционирование алгоритма позволяет получать адекватные результаты расчётов для любых реальных исходных составов, температуры и давления.

Допущения математической модели «металл-шлак-газовая фаза»:

1. Metallургическая система состоит из следующих фаз: металл, шлак и газовая фаза;
2. Шлак представляет собой конденсированную фазу, в которой растворены различные химические соединения: оксиды, сульфиды, фториды, нитриды и др.
3. Температура всех фаз принимается одинаковой.

Модель расчёта химического состава металла и шлака во времени с учётом технологических параметров сталеплавильного агрегата включает следующие основные блоки:

- термодинамический блок (расчёт равновесия в системе металл-шлак-газ);
- тепловой блок (вычисление температуры системы и массы расплавившихся материалов);
- управляющий блок (ввод характеристик работы агрегата, взаимодействие между термодинамическим и тепловым блоками).

Расчётные результаты программы ГИББС хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными на металлургических предприятиях при условии применения методики адаптации расчёта к реальным условиям работы металлургических агрегатов и объектов исследований.

Приведённые примеры предоставляют далеко неполный список известных программ для расчёта термодинамического равновесия и свойств элементов для металлургических систем. Можно указать несколько причин существования такого большого числа алгоритмов и программ расчёта равновесного состава. Во-первых, задача расчёта равновесного состава – это интересная и сложная задача на отыскание координат условного экстремума, которую можно свести к решению системы нелинейных уравнений и неравенств. Во-вторых, исследователи имеют дело с огромным числом различных термодинамических систем, которые представляют свои конкретные особенности, поэтому существует большое число термодинамических моделей, причём параметры большинства из них известны лишь для небольшого числа веществ. Для определения параметров моделей необходимо иметь экспериментальные данные и достаточные теоретические основа-

ния, поэтому это не простая задача. Ситуация усложняется тем обстоятельством, что связь между параметрами модели и равновесным составом является нелинейной. Фазовый состав системы заранее неизвестен и должен быть установлен в процессе вычислений, поэтому целевая функция не является непрерывной и может иметь разрывы в точках фазовых переходов. Это также усложняет решение задачи. Кроме того, зачастую значение целевой функции очень слабо меняется в окрестности решения, поэтому иногда в процессе решения можно получить неверный фазовый и химический состав системы [213]. Говоря о сложности задачи, следует принять во внимание чрезвычайно широкий диапазон изменения равновесных концентраций веществ (десятки порядков), а также ограниченные возможности компьютерной арифметики (вычисления производятся с конечным числом заданных цифр и сложности хранения и обработки информации о параметрах моделей).

В своей монографии Белов [85] сделал следующий важный вывод по универсальным средствам моделирования, при помощи которых можно было бы исследовать методами термодинамики любые равновесные состояния и процессы: «Результаты термодинамических вычислений следует рассматривать критически, подвергая их всестороннему анализу с использованием всей доступной информации о системе, уточняя модель и её параметры и повторяя расчёт. В этом и заключается искусство термодинамического моделирования».

Достоинство термодинамического подхода в том, что проведение исследований возможно без привлечения дополнительных экспериментальных данных, на основании только сведений из фундаментальной базы данных, сопряженной с программными средствами.

2.2 Термодинамический модуль программного комплекса SyTherMa

С целью оперативной и адекватной разработки технологии «чистая сталь» появилась необходимо иметь под рукой «удобный» металлургический калькулятор для термодинамических расчётов металлургических процессов, происходя-

щих в реальных системах (сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, кристаллизатор УНРС и пр.). Кроме этого необходимо в данный «калькулятор» добавить возможность непрерывного мониторинга сталеплавильного производства.

Термодинамический модуль (начиная с версии программы v.3.4.3, 2018) программного комплекса SyTherMa (группа разработчиков: Котельников Г.И., Толстоуцкий А.А. и Ботников С.А.) на основании взаимодействия компонентов в системе «металл-шлак-газовая фаза» с использованием основных принципов термодинамики производит расчёт состава и массы металла, шлака и газовой фазы (рисунок 2.1). Для реализации расчётов на основе других элементов (Ni, Cu и д.т.) необходимо пересчитать константы. Добавлены в базу материалы, которые сейчас используются на предприятиях черной металлургии РФ (например, CaC_2 , SiC, глинозёмы, бокситы и др.), 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 были перепроверены в сертифицированной лаборатории и внесены в базу программы SyTherMa (далее по тексту – STM). Использовались не справочные данные, а фактические данные с металлургического предприятия.

В программе STM приняты следующие стандартные состояния для:

- металла – это чистые компоненты в состоянии бесконечно разбавленного раствора (ЧКБРР);
- шлака – жидкое состояние;
- газа – идеальный газ.

Применение ЧКБРР позволяет не использовать в расчётах гамму бесконечности и упрощает термодинамический расчёт.

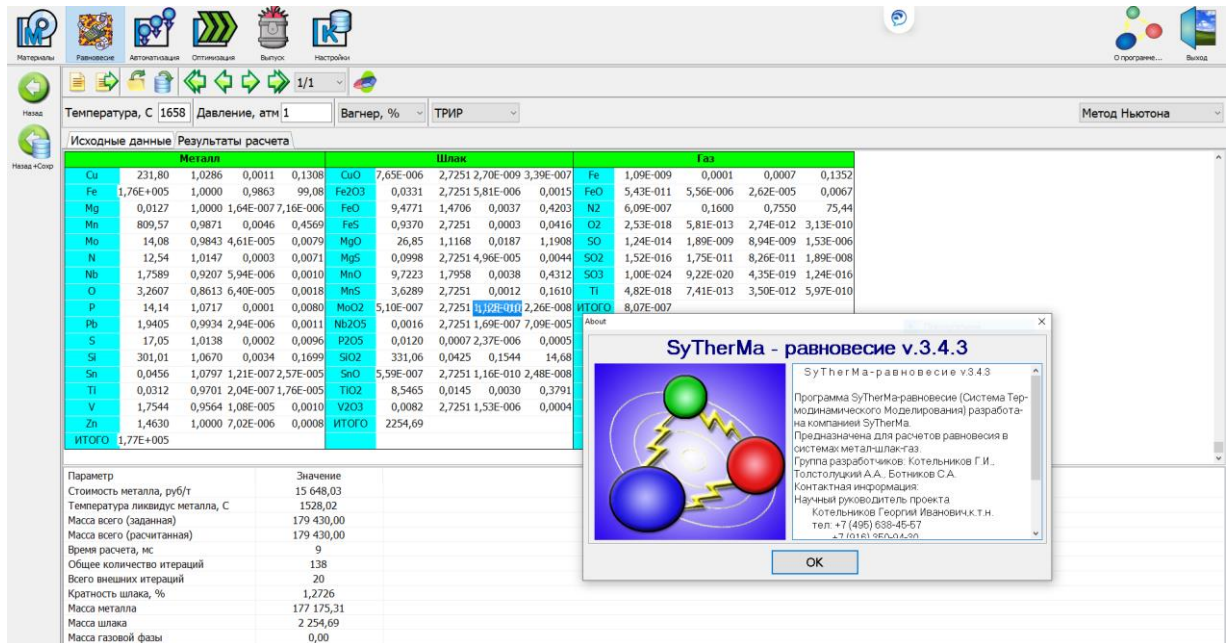


Рисунок 2.1 – Экранная форма программы STM с результатами расчёта состава выпущенной плавки из ДСП-180 в сталеразливочный ковш после процессов раскисления, легирования и шлакообразования

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 (БРР) и теория субрегулярных растворов (ТСР), а по шлаку – совершенный (идеальный) раствор и модель раствора как фазы, имеющей коллективную электронную систему (МКЭ).

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. Обычно коэффициенты неравновесности подбираются по 2-3 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.

Проверка адекватности программы STM

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.

2.3 Методы углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных»

«Цифровизация» в металлургии

Тенденция внедрения информационных технологий в промышленности нашла отражение в Программе развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года [231]. Согласно этой Программе можно отметить некоторые изменения в промышленности, которые следует отнести к металлургической отрасли: сквозная автоматизация и интеграция производственных и управленческих процессов в единую информационную систему («от оборудования до министерств»); цифровое проектирование и моделирование технологических процессов, объектов, изделий на всём жизненном цикле от идеи до эксплуатации (применение инженерного программного обеспечения); применение мобильных технологий для мониторинга, контроля и управления процессами на производстве; цифровое рабочее место; развитие технологий промышленной аналитики, прогнозирование качества; мгновенное реагирование и многое другое. Такая цифровизация в управлении промышленности проявится в виде получения данных в реальном времени и высокой скорости принятия решений. Изменения правил в реаль-

ном времени – мгновенное реагирование на изменения и интерактивность среды. Для реализации этого необходимо чтобы на металлургических предприятиях были внедрены в производственную практику адекватные модели. Сегодня компании в основном пользуются АСУ ТП, но необходимы новые решения по моделям, работающим в режиме реального времени или автоматизация новых интеллектуальных функций и «машинное обучение», технологии искусственного интеллекта (ИИ/AI) и методы углубленной аналитики. Реализация новых цифровых технологий стала возможной с появлением мощных компьютеров и снижения затрат на вычислительные мощности. Здесь необходимо понимать, что ИИ имеет в виду технологические решения, которые на основе алгоритмов машинного и глубокого обучения смогут встроиться в технологические цепочки и выдавать результаты лучше и быстрее, чем человек, но под его обязательным контролем.

Четыре тенденции, которые влияют на использование инструментов цифровизации (в том числе, и в металлургии) [205, 265]:

- увеличение объёма данных, вычислительной мощности и возможностей сетевого взаимодействия (90 % данных от общемирового объёма было создано за последние три-четыре года);

- цифровизация технологических процессов. Размещение цифровых средств на рабочих объектах, формирование цифровых процессов и обеспечение принятия решений (оперативная память у телефона iPhone5 (2012 г) в 250 тыс. раз больше, чем у компьютера на борту космического корабля «Аполлон-11». Через 8 лет вышел iPhone12 у которого оперативная память стала в 4 раза больше чем у iPhone5);

- автоматизация основных звеньев цепочки создания ценности и средств дистанционного управления производством (снижение расходов на робототехнику по сравнению с расходами на оплату труда, начиная с 1990 г., составило 200 %);

- поведение, потребности и требования 63 % клиентов меняются быстрее, чем когда-либо (63 % клиентов ожидают, что производители будут предоставлять новые качественные продукты и услуги).

Цифровые технологии приведут к кардинальным изменениям в области металлургии по следующим направлениям:

- закупки;
- выбор поставщиков сырья;
- управления технологическими процессами (повышение производительности примерно на 10 %, снижение потерь выхода продукции примерно на 20 % и снижение расхода энергозатрат на 5-10 % за счёт использования алгоритмов углубленной аналитики, в целях усовершенствования механизма управления технологическими процессами, совместно с роботизацией опасных видов работ: повышается безопасность производственного персонала и повышается воспроизводимость технологии);
- обслуживание и инженерное обеспечение;
- планирование и логистика системы снабжения;
- цифровая система управления эффективностью;
- услуги служб поддержки и НИОКР;
- маркетинг и продажи.

Самые большие экономические эффекты находятся в управлении технологическими процессами – до 25 долл. США/т.

Возможное целевое видение «цифрового металлургического» производства это:

- повышение производительности и снижение потерь в выходе годной продукции за счёт использования прогнозирующих моделей и умных датчиков (например, технологии распознавания изображений);
- динамический контроль шихтовки позволяет снизить колебания химического состава расплава на 50 %;
- увеличение эксплуатационного ресурса огнеупора на 20-30 % за счёт корректировки рабочих точек температуры и оперативного контроля качества с применением инновационных технологий;
- роботизация «чёрных», сопряженных с опасностью и повторяющихся операций и исполнение стандартных операционных процедур с применением цифро-

вых технологий способствуют повышению безопасности и стандартизации выполняемых работ.

В настоящее время актуален новый комбинированный подход совершенствования технологии производства стали, когда происходит внедрение методов углубленной аналитики (Advanced Analytics) и машинного обучения (Machine learning) с применением «больших данных». Следует применять структурированный подход для внедрения элементов углубленной аналитики, который представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Схема применения структурированного подхода для внедрения элементов углубленной аналитики

Основные этапы	Этапы периода подготовки до внедрения на производстве элементов углубленной аналитики				Период внедрения
Подэтапы	1.1 Создание объединенного массива данных	1.2 Выполнение предварительного анализа	1.3 Построение модели	1.4 Оптимизация (корректировка) и совершенствование модели	Внедрение в работу
Основные мероприятия	Сбор и объединение данных из многочисленных источников; Очистка массива данных с целью обеспечения последовательности данных	Проверка качества сводных данных; Первый прогон анализа для расчёта размера эффекта	Построение модели на основе аналитических данных, машинного обучения и гипотез; Тестирование и подтверждение полученных результатов с участием экспертов (технологов) и использованием аналитической информации	Использование модели для выявления ключевых параметров реализации потенциала совершенствований; Определение возможных изменений в рабочих параметрах, технологических процессах, оборудовании	Использование выводов, полученных после прогона модели на производстве; Дальнейшая доработка модели; Сравнение фактических результатов с исходными экономическими обоснованиями
Результат	Создан файл очищенных систематизированных данных	Установлен потенциал создания стоимости	Разработана модель, которая может быть использована для оптимизации (корректировки) технологии	Выявлен список конкретных параметров оптимизации (корректировки) технологии	Рекомендации от модели применяются в оперативной работе цеха на постоянной основе

По данной схеме была выполнена задача автором диссертации по прогнозированию температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковше в действующем сталеплавильном цехе.

Для выявления первопричины проблем и установления наиболее релевантных технологических параметров разработаны дерево принятия решений, модели «случайный лес» и «градиентный бустинг».

Метод «дерево принятия решений»

Дерево принятия решений является прогнозной моделью, предполагая создание карты (рисунок 2.2), на которой отображаются как результаты наблюдений за конкретной позицией, так и выводы относительно целевых показателей. Дерево принятия решений также может называться деревом классификации (дискретные выходные данные) или регрессионным деревом (непрерывные выходные данные). Практическая польза – условие объясняется с помощью булевой логики; надежный и эффективный инструмент для обработки большого массива данных за короткое время.

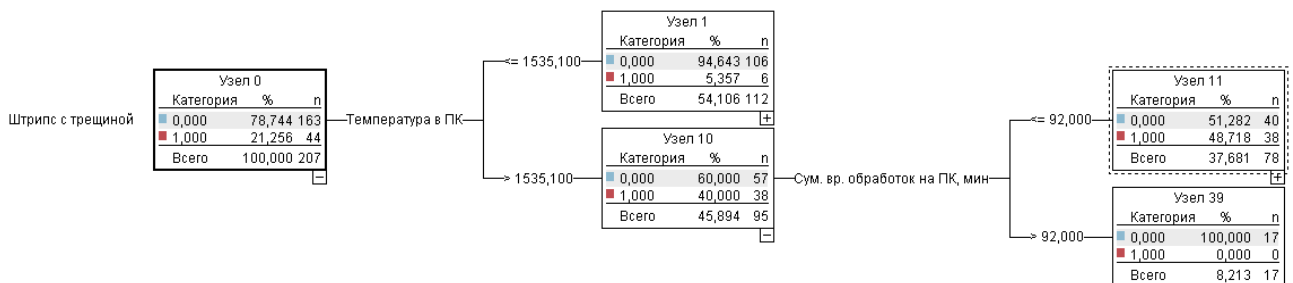


Рисунок 2.2 – Пример карты метода «Дерево принятия решений»

Метод «случайный лес»

«Случайный лес» является алгоритмом машинного обучения для классификации и регрессии данных, образующих деревья принятия решений в целях прогнозирования. Для определения конечных результатов используется произвольное количество деревьев принятия решений (рисунок 2.3).

Практическая польза – модель является точной и может использоваться при работе с большими базами данных; даёт представление о том, какие атрибуты являются важными на этапе классификации.

Метод «градиентный бустинг»

Использование комбинации моделей для повышения точности. Аналогия: проводится консультация у нескольких врачей, далее ставится взвешенный диагноз, вес которому присваивается с учётом точности предыдущего диагноза (рисунок 2.4). Это самый распространённый метод, который можно применять в металлургии. Базовым алгоритмом могут выступать два выше представленных методов («случайный лес» и «дерево принятия решений»). С помощью градиентного бустинга можно решать задачи регрессии, классификации, мультиклассификации и ранжирования данных.

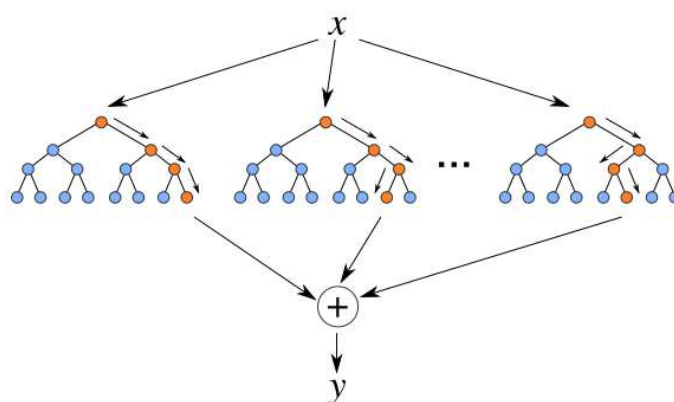


Рисунок 2.3 – Пример схемы метода «Случайный лес»

Практическая польза – изучение превалирующих и наиболее важных параметров, влияющих на целевую функцию.

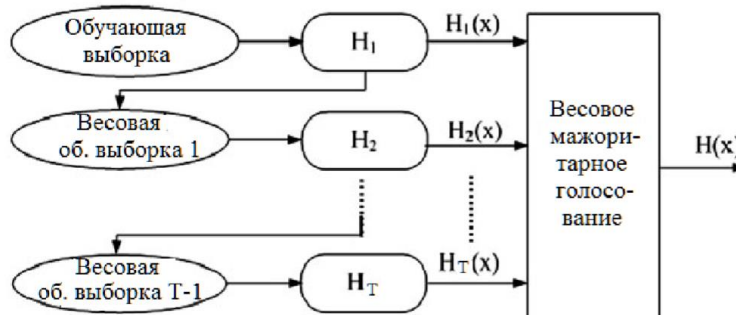


Рисунок 2.4 – Пример схемы метода «Градиентный бустинг»

2.4 Пример разработки модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах методами машинного обучения

Соблюдение заданных интервалов температуры в промежуточном ковше во время разливки является одной из ключевых задач поддержания высокого качества непрерывнолитого металла. Регламентированный температурный интервал в промежуточном ковше определяется перегревом металла над температурой ликвидус. Обычно, этот диапазон составляет от 15 до 35 °С. Температура ликвидус – это расчётное значение, которое определяется химическим составом разливаемой стали. В литейно-прокатном комплексе АО «ВМЗ» (ЛПК) целевой интервал составляет 16-29 °С. Значения перегрева металла над температурой ликвидус меньше 15 °С и больше 30 °С являются отклонением от ключевых технологических параметров ЛПК, оказывающих существенное воздействие на качество готового металла. В мировой практике выполнение требований по соблюдению перегрева металла в промежуточном ковше в диапазоне 15-30 °С считается достаточно сложной задачей, решаемой за счёт применения современных способов снижения тепловых потерь, мониторинга и контроля [150, 168, 169, 198-200]. 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 [232, 252]. Поэтому задача контроля температуры в ходе разливки и исключение резких её перепадов является ключевой.

Для марок сталей с содержанием углерода более 0,5 мас. % данная задача особенно важна для дальнейшего получения металлопродукции высокого качества. При высоком перегреве стали (более 30 °С) металл в ходе кристаллизации подвержен сильной сегрегации, внутреннему растрескиванию и усадке из-за пе-

реплавки равноосных кристаллов, когда происходит формирование расширенной столбчатой зоны за счёт центральной равноосной зоны. Температура жидкой стали оказывает большое влияние на качество продукции из-за своего воздействия на состояние структуры непосредственно после разливки, в связи с чем перегрев должен быть минимизирован. С другой стороны, низкий перегрев (менее 15 °С) может привести к увеличению содержания неметаллических включений из-за замерзания стали, изменения физико-химических свойств ШОС из-за неметаллических включений в кристаллизаторе, которые приводят к увеличению поверхностных и подповерхностных дефектов, а также захвату ШОС в тело слитка, увеличению вероятности прорыва кристаллизующейся корочки металла на УНРС и др. Таким образом, чтобы исключить и минимизировать данные недостатки и обеспечить оптимальные условия разливки на УНРС, необходимо обеспечивать перегрев металла над температурой ликвидус в ограниченном и узком диапазоне.

Данные требования по перегреву металла над температурой ликвидус обеспечиваются выполнением технологии и корректировкой технологических параметров на участке внепечной обработки стали (УКП – установка ковш-печь, ВД – вакууматора) с учётом рекомендаций от персонала УНРС по заказываемой температуре в сталеразливочном ковше и данных с участка подготовки ковшей. Необходимо отметить, что фактический перегрев металла в промежуточном ковше над температурой ликвидус в большей степени определяется температурой металла в сталеразливочном ковше и его историей эксплуатации. На УНРС отсутствует возможность повлиять на температуру металла в промежуточном ковше в ходе разливки, так как тепловые потери в промежуточном ковше постоянны. На практике бывают случаи, когда не обеспечивается выполнение целевых значений перегрева металла над температурой ликвидус. При этом отклонения технологии со стороны операторов (например, температура заказанная и отданная, температура футеровки ковша перед выпуском плавки, укрытие ковша теплоизолирующей смесью, температура плавки и др.) не выявляются. Анализ подобных случаев показывает существенное влияние скрытых, неучтенных факторов, таких как: химический состав шлака, временные задержки сталеразливочного ковша, интенсив-

ность продувки аргоном в сталеразливочном ковше и др. Таким образом, можно утверждать, что задача по прогнозированию необходимой температуры стали в сталеразливочном ковше перед разливкой на УНРС в режиме реального времени актуальна и значима при производстве высококачественной стали.

На рисунке 2.5 авторы статьи [198] приводят многообразие физических явлений, влияющих на изменение температуры стали на разных этапах технологического процесса.

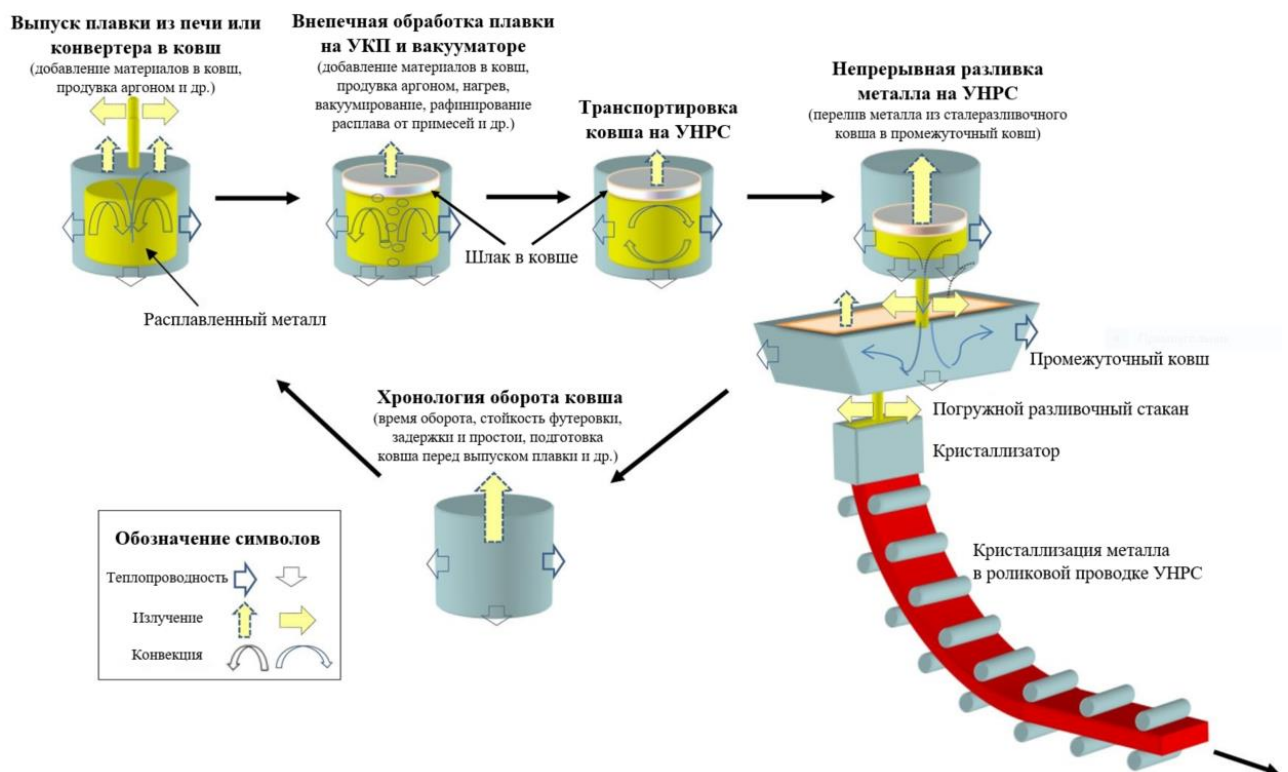


Рисунок 2.5 – Схематическое изображение технологической цепочки в сталеплавильном цехе и некоторые факторы, оказывающие влияние на изменение температуры стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах

Внепечная обработка стали на УВП и ВД, транспортировка сталеразливочного ковша, скачивание шлака, наведение шлака, история работы ковша и множество других последовательных стационарных или динамических процессов влияют на температуру стали. При этом задача построения какой-либо целостной модели для прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше на основе всех исторических данных от выпуска плавки до промежуточного ковша

считается очень сложной. Построение классической тепловой модели с учетом тепловых потерь возможно, но довольно сложно из-за многочисленных влияющих факторов, ряд из которых трудно поддается параметризации и определению. В этом случае рекомендуется выбрать подходы по прогнозированию температуры, основанные на статистических методах с использованием современных математических средств.

В таблице 2.3 представлен опыт применения статистических моделей на различных заводах [150, 168, 169, 198-200] по решению задачи прогнозирования и контроля температуры стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

Таблица 2.3 – Примеры выполненных задач по прогнозированию температуры стали в сталеразливочном и промежуточном ковшах

Методы и результаты	Название предприятия			
	Ruukki Raahе Steel-works (Финляндия)	SSAB MOBILE (США)	SeverStal Columbs (США)	Evraz Regina Steel (Канада)
Методы выполнения задачи	Гибридная модель, основанная на тепловом статусе ковша, статистике и нейронной сети. В качестве метода моделирования использовалась нейронная сеть с байесовским многослойным перцептроном (MLP – multilayer perceptron) для задач регрессии.	1. Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics – CFD) и методы конечных элементов (Finite Element Method – FEM); 2. Комбинация аналитических и статистических моделей.	Материальный и тепловой баланс. Дополнительно применялась химическая модель для расчёта отдачи необходимого количества материалов в ковш.	Комплексная автономная модель прогнозирования температуры металла в сталеразливочном ковше, состоящая из offline и online моделей с функцией самообучения.
Результаты выполненной задачи	Модель дала отличное согласование между измеренными и прогнозируемыми температурами металла в промежуточном ковше. Во время разливки на 90 % плавков температурный диапазон составлял 7 °С, а на 99 % плавков – 11 °С [198, 199].	Комплексная модель реализована на трёх агрегатах: УКП, вакууматор и УНРС. После внедрения модели индекс соответствия перегрева плавки в промежуточном ковше увеличился, что сказалось на уменьшении частоты изменений скорости разливки на УНРС из-за низкого или высокого перегрева металла. Это одно из мероприятий в цехе, которое позволило увеличить серийность на УНРС и общую производительность цеха [200].	Точность прогнозирования температуры составила ± 5 °С. После внедрения модели в работу на 5 % плавков улучшился контроль по температуре перегрева [168].	Улучшение по перегревам более чем на 40% от исходного уровня до внедрения модели в работу. Был снижен коэффициент отлитых слэбов с отклонениями по температуре с 12 до 7 %, что в итоге привело к повышению качества непрерывнолитых слэбов [150, 169].

На всех предприятиях [150, 168, 169, 198-200] отмечается получение положительных результатов при внедрении прогнозных моделей. При этом для получения надежных данных для прогнозной модели необходимо измерение температуры металла в промежуточном ковше осуществлять непрерывным методом, а не точечным замером с использованием термоэлектрического преобразователя (термопары). Внедрение прогнозных моделей требует изменения графического интерфейса (ЧМИ – человеко-машинный интерфейс) контроля температуры металла для операторов основных технологических агрегатов (УКП, ВД и УНРС). Представленные примеры моделей в таблице 2.3 носят рекомендательный характер и не дают управляющих команд на изменение технологических операций на агрегатах. Также на всех предприятиях отмечается, что данные работы будут продолжены по повышению точности прогноза до погрешности измерительных приборов (от $\pm 1,5$ до $\pm 3,0$ °С).

Этапы периода подготовки до внедрения на производстве элементов углубленной аналитики

Постановка задачи в ЛПК

С целью исключения или снижения случаев отклонений по температуре в промежуточном ковше для совершенствования технологии производства тонкого сляба толщиной 90,5 мм, а также минимизации удельного потребления электроэнергии и расхода графитированных электродов при внепечной обработке стали было принято решение о разработке и внедрении модели прогнозирования требуемой температуры металла в сталеразливочном ковше в ЛПК под руководством автора диссертации [261-264]. На первом этапе работы требовалось разработать прогнозную математическую модель по двум технологическим маршрутам ДСП-УКП-УНРС и ДСП-УКП-ВД-УНРС. Модель должна учитывать маршруты обработки стали и выдавать рекомендации по требуемой температуре металла на УКП, с целью получения требуемого интервала температур металла в проме-

жуточном ковше на УНРС. Из-за отсутствия подогрева металла на вакууматоре, контроль температуры на УКП имеет определяющее значение. Кроме этого, есть и другие технологические факторы, которые могут существенно влиять на тепловой баланс металла в ковше. Поэтому их учёт в разрабатываемой модели носит обязательный характер. На втором этапе работы была запланирована интеграция разработанной модели в существующую систему автоматизации ЛПК.

В условиях ЛПК было принято решение идти по пути создания комбинированной модели, содержащей в себе элементы статистики и экспертных знаний. Необходимо было разработать и внедрить в работу на ЛПК модель контроля перегрева, основанную на аналитических расчётах рекомендаций температуры металла в сталеразливочном ковше на УКП перед отдачей ковша на ВД или УНРС.

Модель контроля перегрева металла, и её адаптация к текущим условиям ЛПК учитывает огнеупорный профиль сталеразливочного ковша, химический состав шлака в ковше, цикл оборота ковша (технологический и ремонтный), поток металла на УНРС (от «узкого» 2,2 т/мин до «широкого» сечения сляба 4,0 т/мин), изменение температуры стали во время разливки и др. Решение должно полностью исключить или частично снизить количество плавов с высокой или низкой температурой металла, идущих с УКП на ВД, так как в таких случаях происходит увеличение продолжительности обработки плавки на ВД и её возврат на УКП после вакуумирования, что оказывает отрицательное влияние на качество стали и производительности цеха.

Подготовка данных и технологических параметров для модели (Этап 1.1 – Создание объединенного массива данных)

Были проанализированы порядка 1000 технологических параметров 2-уровня автоматизации, которые собираются в условиях ЛПК. Для учёта тепловых потерь сталеразливочного ковша, экспертно было установлено, что необходимо собирать дополнительно следующие технологические параметры производства:

- данные по огнеупорам сталеразливочных ковшей (стойкость и факты замены огнеупорных элементов ковша, замечания по продувочным пробкам и др.);
- полная основность шлака $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$, как косвенная характеристика вязкости шлака;
- продолжительность нахождения металла в ковше (в минутах);
- продолжительность нахождения ковша без металла (в минутах);
- время нахождения ковша под газовым нагревом (в минутах).

По опыту работы ЛПК при основности $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ менее 1,6 шлак обычно находится в жидком состоянии (жидкоподвижный шлак), а при значениях более 1,6 – шлак, как правило, вязкий и может находиться даже в твёрдой фазе. Состояние шлаковой фазы значительно влияет на потери температуры металла через шлак в виде излучения. Повышенная вязкость шлака при значениях полной основности $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ более 1,6 затрудняет теплоперенос от металла через шлак, что вызывает замедление процесса охлаждения стали. Практика ЛПК показывает, что при вязком состоянии шлака, применение интенсивной продувки металла аргоном не позволяет достаточно быстро снизить температуру металла в сталеразливочном ковше. При этом потери тепла не превышают 2,0 °С/мин и в среднем находятся в интервале от 0,5 до 1,0 °С/мин. При жидкоподвижном шлаке (отношение $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ менее 1,6) и интенсивной продувке потери тепла составляют более 2,0 °С/мин.

В процессе выполнения данной работы для технологического персонала участка внепечной обработки стали и УНРС была добавлена дополнительная информация по визуализации параметров сталеразливочного ковша: состояние ковша и временные характеристики оборота ковша в цеху. Это позволило улучшить информационный массив для операторов УКП и ВД по адекватной корректировке температуры металла в сталеразливочном ковше перед передачей плавки на разливку.

Следует отметить, что перед построением модели были исключены все «нетипичные» плавки, например, плавки, находившиеся долгое время в сталеразли-

вочном ковше из-за внеплановых прерываний серий на УНРС. Не были включены в обучающую выборку плавки, выпущенные насухо с печным шлаком перед планово-предупредительными ремонтами.

В ходе подготовки данных для модели были учтены отличительные параметры технологии внепечной обработки рядовых и коррозионностойких марок стали (с требованиями по ХИК/НІС), для которых имеются особенности нагрева металла на УКП, ведения шлакового режима (отлив шлака перед вакуумированием и отдача теплоизолирующей смеси) и последующего вакуумирования, в том числе продолжительности глубокого вакуумирования. Таким образом, все технологические особенности цеха, которые влияют на точность прогнозной модели, были максимально учтены.

Построенная математическая модель использует технологические параметры 2-го уровня автоматизации производства ЛПК агрегатов УКП, вакууматора и УНРС. Тестирование модели выполнено для двух технологических маршрутов: ДСП-УКП-УНРС и ДСП-УКП-ВД-УНРС. В качестве целевой переменной (прогнозируемого значения) была выбрана медиана непрерывного замера температуры стали в промежуточном ковше за период разлива данной плавки. Непрерывный замер температуры стали осуществляется посредством считывания показаний инфракрасного излучения при погружении температурного зонда из абсолютно чёрного тела в расплавленную сталь (рисунок 2.6). Погрешность измерения составляет $\pm 1,5$ °С, что в два раза точнее, чем термопарой погружения. В публикации [206] отмечается высокая точность и низкая дисперсия данных, полученных системой непрерывного измерения температуры металла в промежуточном ковше, относительно термопар, что также подтверждено практикой работы ЛПК.

Построение модели проводилось на данных второго уровня АСУ ТП за период 8 месяцев 2018 года. Проверка модели проводилась по тестовой выборке и данным нового периода. Массив для обучения делился на две выборки в отношении 3:2 — обучающую и тестовую. Первая часть использовалась только для расчёта коэффициентов модели, вторая для её проверки. Исходные данные формировались в отдельные Excel-файлы по агрегатам (УКП, ВД, УНРС). Далее

выполнили формирование подходящих структур, очистку данных, сборку их в единый массив, обучение алгоритмов (расчёт коэффициентов), считывание новых данных для проверки, расчёт новых прогнозных значений температур в промежуточном ковше и метрик для оценки качества моделей.

Построение прогнозной модели температуры металла (Этап 1.2 – Выполнение предварительного анализа)

Построение модели осуществляли на языке программирования Python с применением алгоритмов машинного обучения Big Data (большие данные), реализованных в Python-библиотеках Numpy, Pandas, Sklearn. При выполнении работы было использовано три алгоритма нелинейных подходов к построению регрессионных уравнений:

1. Регрессия на основе дерева решений;
2. Регрессия на основе случайного леса;
3. Регрессия на основе градиентного бустинга на решающих деревьях.

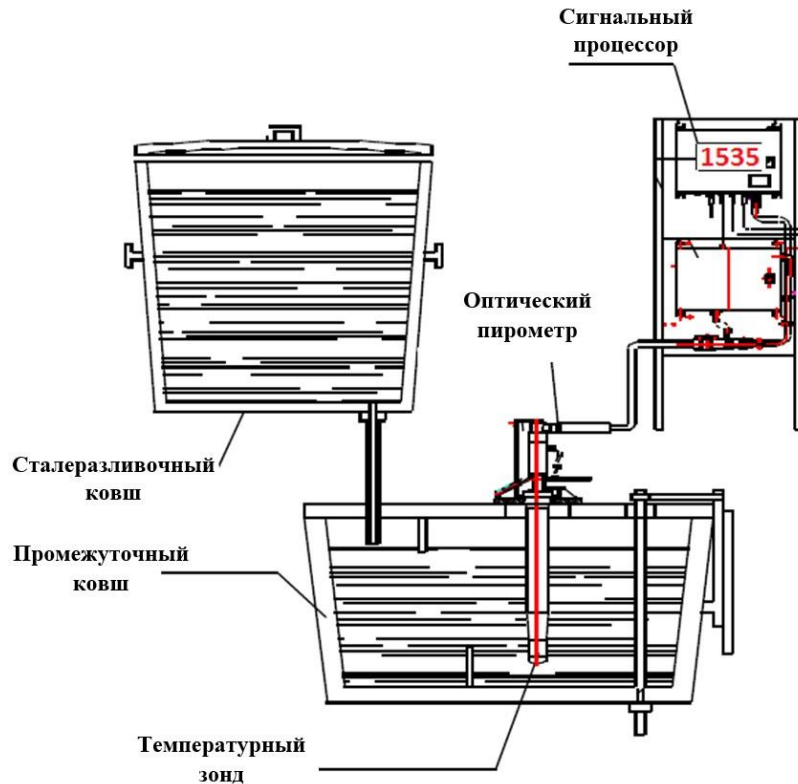


Рисунок 2.6 – Схема системы непрерывного измерения температуры жидкого металла в промежуточном ковше УНРС в ЛПК

«Обучению» моделей, то есть определению параметров регрессий, предшествовал анализ данных и очистка массивов от аномальных значений. При очистке стремились сохранить как можно больше записей, предпочитая удалению записей замену аномальных значений на наиболее вероятные. В большинстве случаев пропущенные данные заменяли на медиану по определенному подмножеству плавок. Доля аномальных значений по некоторым параметрам достигала 1-2 %.

Этап 1.3 – Построение модели

Во время выполнения работы перечень используемых факторов дополнялся и уточнялся. Например, были добавлены параметры, касающиеся оборота стале-разливочных ковшей и стойкости их футеровки, химический состав шлака в ковше и др. Указанные факторы вошли в окончательный перечень параметров, отобранных алгоритмами для расчёта температуры металла в промежуточном ковше и позволили заметно увеличить точность моделей.

В окончательном варианте наилучшее качество показала модель, построенная по алгоритму 3 (градиентный бустинг). Метрики построенной модели для плавок по маршрутам ДСП-УКП-УНРС и ДСП-УКП-ВД-УНРС представлены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Метрики построенной модели для плавок по маршруту ДСП-УКП-УНРС

Характеристика	Значение для обучающей / тестовой части выборки
Всего плавок в выборке	1192
Число плавок в обучающей (L) части выборки	715
Число плавок в тестовой (T) части выборки	477, соотношение T / (L + T) X 0,4
Число включенных факторов	41
Средняя квадратичная ошибка	1,644 / 5,399 °C ²
Коэффициент детерминации R ²	0,962 / 0,882
Средняя абсолютная ошибка	1,019 / 1,798 °C
Медиана абсолютной ошибки	0,828 / 1,410 °C

Таблица 2.5 – Метрики построенной модели для плавков по маршруту ДСП-УКП-ВД-УНРС

Характеристика	Значение для обучающей / тестовой части выборки
Всего плавков в выборке	4233
Число плавков в обучающей (L) части выборки	2539
Число плавков в тестовой (T) части выборки	1694, соотношение T / (L + T) X 0,4
Число включенных факторов	53
Средняя квадратичная ошибка	3,449 / 5,884 °C ²
Коэффициент детерминации R ²	0,945 / 0,904
Средняя абсолютная ошибка	1,460 / 1,885 °C
Медиана абсолютной ошибки	1,214 / 1,551 °C

Этап 1.4 – Оптимизация (корректировка) и совершенствование модели

В таблицах 2.6 и 2.7 представлена значимость технологических топ-факторов (параметров), оцениваемая моделью на прогноз температуры металла в промежуточном ковше для маршрутов: ДСП-УКП-УНРС и ДСП-УКП-ВД-УНРС.

Исходя из данных таблиц 2.6 и 2.7 следует, что для соответствующего маршрута из 41 и 53 факторов в топ значимых факторов вошли лишь 13 и 15 соответственно. Причем для маршрута ДСП-УКП-ВД-УНРС есть отличительные факторы: расход аргона на плавку (м³) и продолжительность вакуумирования. Другие факторы, которые не показаны в таблицах 2.6 и 2.7 рекомендуется из моделей не исключать, а оставить их с целью получения надежного прогноза температуры. Значимость представленных топ-факторов ЛПК на других предприятиях может значительно отличаться из-за особенностей технологического процесса для конкретного цеха и агрегатов.

Таблица 2.6 – Относительная значимость топ-факторов, оцениваемая моделью по маршруту ДСП-УКП-УНРС

№	Фактор	Значимость фактора в модели
1	Запрашиваемая температура отдачи металла с УКП на УНРС (°С)	4,3106
2	Температура металла в промежуточном ковше УНРС на плавке, разлитой за одну перед данной плавкой в своей серии (°С)	3,4060
3	Продолжительность нахождения сталеразливочного ковша без металла (мин)	2,8615
4	Полная основность шлака в сталеразливочном ковше $CaO/(Al_2O_3+SiO_2)$	2,7305
5	Продолжительность между отдачей ковша с УКП и началом разливки на УНРС (мин)	1,5367
6	Температура футеровки сталеразливочного ковша перед выпуском плавки с ДСП (°С)	0,8870
7	Последняя температура металла на УКП (°С)	0,6921
8	Температура металла в промежуточном ковше УНРС на плавке, разлитой за две перед данной плавкой в своей серии (°С)	0,6025
9	Продолжительность нахождения металла в сталеразливочном ковше (мин)	0,5486
10	Стойкость огнеупоров сталеразливочного ковша в «зоне стали» (плавок)	0,4849
11	Расход электроэнергии на подогрев металла в УКП (МВт·ч)	0,4052
12	Стойкость огнеупоров сталеразливочного ковша в «шлаковом поясе» (плавок)	0,2151
13	Температура выпуска металла из ДСП (°С)	0,1267

Таблица 2.7 – Относительная значимость топ-факторов, оцениваемая моделью по маршруту ДСП-УКП-ВД-УНРС

№	Фактор	Значимость фактора в модели
1	Запрашиваемая температура отдачи металла с ВД на УНРС (°С)	13,4718
2	Последняя температура металла на ВД (°С)	5,6728
3	Температура металла в промежуточном ковше УНРС на плавке, разлитой за одну перед данной плавкой в своей серии (°С)	3,2163
4	Продолжительность нахождения сталеразливочного ковша без металла (мин)	1,7257
5	Полная основность шлака в сталеразливочном ковше $CaO/(Al_2O_3+SiO_2)$	1,5503
6	Продолжительность между отдачей ковша с ВД и началом разливки на УНРС (мин)	1,1031
7	Суммарный расход аргона на продувку плавки (м ³)	1,0719
8	Температура футеровки сталеразливочного ковша перед выпуском плавки с ДСП (°С)	0,7589
9	Стойкость огнеупоров сталеразливочного ковша «шлаковый пояс» (плавок)	0,5996
10	Температура металла в промежуточном ковше УНРС на плавке, разлитой за две перед данной плавкой в своей серии (°С)	0,5926
11	Продолжительность нахождения сталеразливочного ковша с металлом (мин)	0,2312
12	Стойкость огнеупоров сталеразливочного ковша «зона стали» (плавок)	0,2145
13	Продолжительность вакуумирования (мин)	0,1972
14	Суммарная продолжительность обработки плавки на УКП (мин)	0,1316
15	Расход электроэнергии на подогрев металла в УКП (МВт·ч)	0,0700

Модель выявила заметную значимость фактора «полная основность шлака $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)$ в ковше», который имеет различное значение влияния по технологическим маршрутам: 2,7305 для ДСП-УКП-УНРС и 1,5503 для ДСП-УКП-ВД-УНРС. Более низкое значение данного фактора в плавках по маршруту с ВД можно объяснить тем, что вакуумированный металл больше перегревается на УКП, технологический процесс ведётся на высоких температурах по сравнению с маршрутом без вакуумирования, что приводит к меньшему влиянию вязкости шлака на потерю температуры металла из-за получения более жидкого шлака. В процессе разработки прогнозной модели было выявлено, что учёт основности шлака в сталеразливочном ковше позволил снизить ошибку расчёта температуры в промежуточном ковше на 0,44 °С.

Влияние стойкости огнеупоров сталеразливочного ковша также отличается по значимости в зависимости от маршрутов: для ДСП-УКП-УНРС стойкость огнеупоров ковша «зона стали» – 0,4849, стойкость огнеупоров ковша «шлаковый пояс» – 0,2151, в то время как для маршрута с ВД эти показатели составили 0,2145 и 0,5996 соответственно. В настоящее время пока не найдены объяснения данному отличию.

Сравнение расчётных и фактических значений температуры стали в промежуточном ковше УНРС по двум маршрутам представлены на рисунке 2.7.

Величина отклонений расчётных и фактических значений температуры стали в промежуточном ковше (оцениваемая для плавки по медиане непрерывного замера для слябов плавки) укладывается в интервал $\pm 7,5$ °С, что является приемлемым для использования полученных моделей для расчёта рекомендаций температуры передачи сталеразливочного ковша с УКП и ВД, снижающих риск высокого, в том числе из-за перестраховки сталевара на УКП, и низкого перегревов плавки на разливке.

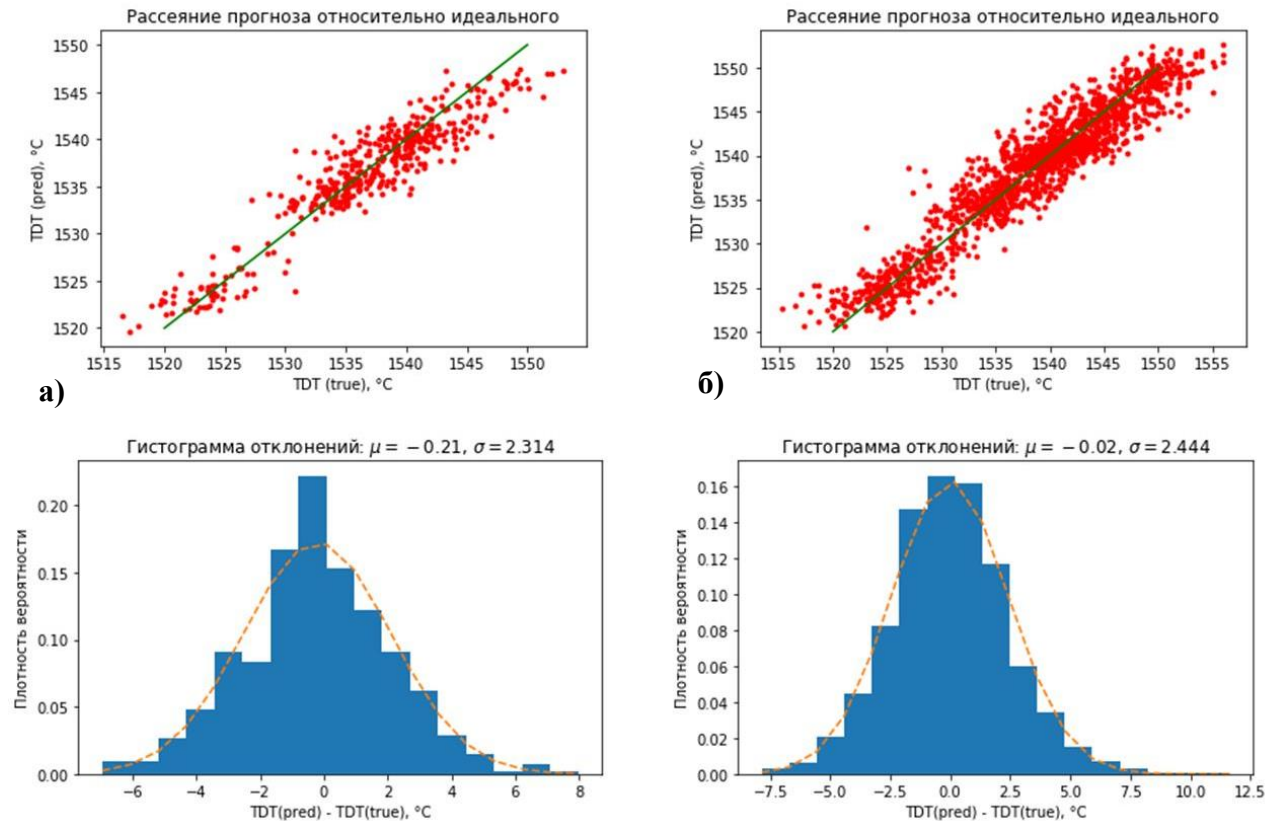


Рисунок 2.7 – Рассеяние и точность прогноза температуры металла по двум технологическим маршрутам плавок: а) ДСП-УКП-УНРС; б) ДСП-УКП-ВД-УНРС

Для оценки надежности разработанной модели прогноза температуры металла была осуществлена дополнительная проверка построенных моделей по более поздним фактическим данным, то есть по данным на которых не строилась модель. Для маршрута без ВД коэффициент корреляции снизился с 0,96 до величины 0,86, но все же остался очень высоким для возможности практического применения модели. Вид распределения величины отклонений практически не изменился, их диапазон по-прежнему составил $\pm 7,5$ °С.

В итоге точность разработанной модели по прогнозу достигла для невакуумированного металла 5,4 °С, а для вакуумированного – 5,9 °С [261-264]. Таким образом, качество полученных моделей для двух технологических маршрутов является очень высоким, модели были рекомендованы для промышленного применения.

По результатам работы было получено следующее.

1. Достигнуто снижение в 4,6 раза случаев разливки слябов с отклонениями от целевых значений по перегреву (15-30 °С) по сравнению со средним уровнем этого показателя до начала проведения работы.

2. Достигнута экономия электроэнергии до 0,75 кВт·ч/т, и снижен расход графитированных электродов на 1 % на УКП за счёт корректировки теплового баланса металла в ковше и исключения «перестраховочного» перегрева плавки при передаче её на вакууматор.

Завершающий этап структурированного подхода внедрения углубленной аналитики

Внедрение в работу разработанной модели на производстве

Промышленное использование модели включает в себя не только исходную настройку, но и регулярный мониторинг качества, обновление и дополнительное машинное обучение на новых данных. Это гарантирует сохранение и повышение качества работы модели в будущем. Данная работа будет продолжена и ожидается, что точность прогноза будет улучшена до значений $\pm 3,0$ °С. Следующим этапом работы будет внедрение разработанной модели в АСУ ТП всего цеха и дополнительное расширение по визуальной информации рекомендуемой температуры металла и скорости снижения температуры металла для сталеразливочного ковша (рисунок 2.8), а также добавление новых и неучтённых технологических параметров производства в ЛПК.

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 сталеразливочного ковша и фактического процесса внепечной обработки стали в условиях литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» (ЛПК). Предложено осуществлять прогноз температуры перегрева металла в ЛПК, применяя статистические модели и учитывая особенности техноло-

гического процесса. На первом этапе осуществлена разработка самой модели путём интеграции двух подходов: алгоритма машинного обучения и вероятностно-графической модели (ВГМ и байесовские сети / PGM – probabilistic graphical models). 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. Уровень точности прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше на первом этапе достиг $6,0^{\circ}\text{C}$, а на втором – $5,4$ и $5,9^{\circ}\text{C}$. На втором этапе была осуществлена 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.

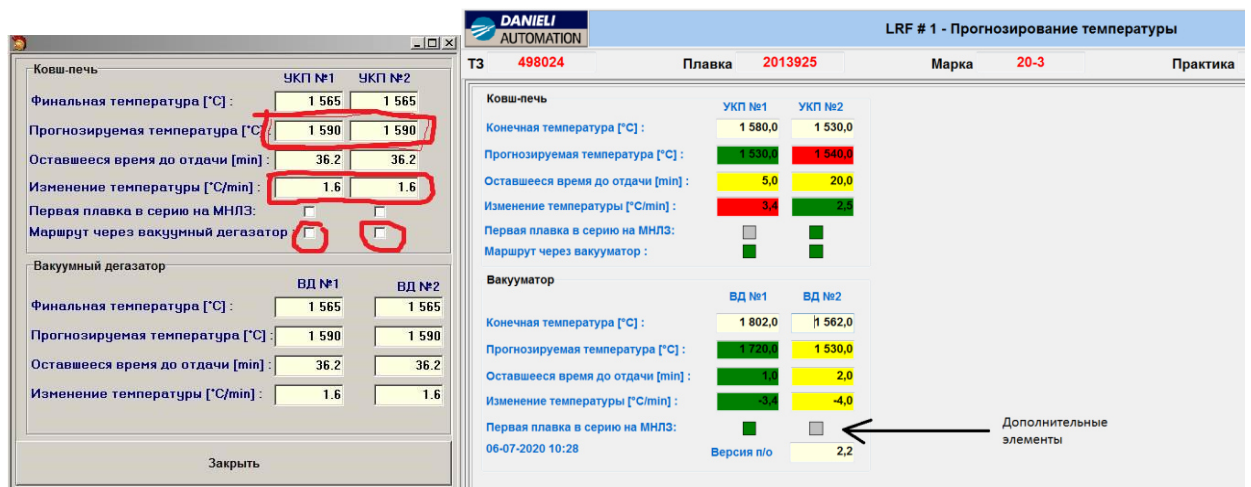


Рисунок 2.8 – Примеры реализации визуализации информации по рекомендуемой температуре расплава на мониторах ЧМИ установках внепечной обработки стали для персонала цеха в АО «ВМЗ» ЛПК

Выводы по главе 2

1. Было показано, что решение задач моделирования с реальными металлургическими объектами можно осуществить с помощью проведения опытных про-

мышленных плавков или расчётным путём с использованием термодинамического равновесия «металл-шлак-газ» и материального баланса.

2. В случае металлургических процессов, несмотря на высокую автоматизацию всех процессов и сталеплавильных агрегатов, отсутствуют надежные и адаптированные модели, способные предсказать конечный результат плавки и качество металлопродукции. С целью успешной работы автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) в сталеплавильном цехе следует рассматривать одновременное применение статистической и динамической модели (термодинамический подход).

3. Несмотря на то, что в мире имеется множество различных программных средств термодинамических расчётов, применяемых для пирометаллургических процессов, была решена поставленная задача по разработке программного модуля STM для промышленных расчётов состава и массы металла, шлака и газовой фазы. Программный модуль STM необходим для оперативной и адекватной разработки технологии «чистая сталь» на примере металлургического калькулятора для термодинамических расчётов в реальных системах (сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, кристаллизатор УНРС и пр.).

4. Особенность и новизна программы STM заключается в следующем. Химические составы всех применяемых материалов были перепроверены в сертифицированной лаборатории и внесены в базу программы STM (использовались не справочные данные, а фактические данные с металлургического предприятия). Добавлены все применяемые в современной металлургии РФ новые материалы как на выплавке, так и на разливке, а также повышена точность промышленных расчётов за счёт расширения количества элементов и расширения баз констант равновесий химических соединений (до 85 компонентов).

5. Было показано, что цифровизация в управлении промышленности проявится в виде получения данных в реальном времени и высокой скорости принятия решений, изменения правил в реальном времени – мгновенное реагирование на изменения и интерактивность среды. На металлургических предприятиях необходимо внедрение адекватных моделей. Сегодня металлургические компании

в основном пользуются АСУ ТП, но также необходимы новые гибридные решения по моделям, работающим в режиме реального времени или автоматизация новых интеллектуальных функций и «машинное обучение», технологии искусственного интеллекта и методы углубленной аналитики.

6. Возможное целевое видение «цифрового металлургического» производства – повышение производительности и снижение потерь в выходе продукции за счёт использования прогнозирующих моделей и умных датчиков; динамический контроль шихтовки позволяет снизить колебания химического состава расплава; увеличение эксплуатационного ресурса огнеупора за счёт корректировки рабочих точек температуры и оперативного контроля качества с применением инновационных технологий; роботизация «чёрных», сопряженных с опасностью и повторяющихся операций и исполнение стандартных операционных процедур с применением цифровых технологий способствуют повышению безопасности и стандартизации выполняемых работ.

7. В настоящее время актуален новый комбинированный подход совершенствования технологии производства стали, когда внедряются методы углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных». Для выявления первопричины проблем и установление наиболее релевантных технологических параметров в металлургии, в первую очередь рекомендуется применять следующие прогнозные модели и алгоритмы машинного обучения: «дерево принятия решений», модели «случайный лес» и «градиентный бустинг».

8. В условиях ЛПК АО «ВМЗ» создана математическая модель на принципах алгоритма машинного обучения прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше при разливке конкретной плавки. Модель показала высокую точность и была рекомендована для промышленного применения. В настоящее время модель интегрирована в производство и предоставляет информацию в качестве рекомендаций для операторов УКП, вакууматора и УНРС. 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.

9. Установлено, что не применимы классические подходы корректировки и совершенствования технологии «чистой стали» с использованием только одного метода (статистика, термодинамическое моделирование, прямые и косвенные методы контроля включений, углубленная аналитика и машинное обучение с применением больших данных, экспертные знания и др.), необходимо комбинировать их и создавать новые гибриды, например, термодинамику совместно с углубленной аналитикой, статистику с экспертными знаниями и машинным обучением и пр.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СТАЛИ

3.1 Разработка технологии выпуска жидкого полупродукта в сталеразливочный ковш и дальнейшая внепечная обработка стали

Раскисление алюминием и шлакообразование в сталеразливочном ковше на практике

Известны различные решения в технологии первичного раскисления стали на выпуске из сталеплавильного агрегата. Первичное раскисление различными раскислителями (алюминий, ферросилиций, ферромарганец), и в том числе комплексных раскислителей (ферросиликомарганец, силикокальций, ферросиликоалюминий и др.). Отсутствует единая концепция первичного раскисления стали с целью получения «чистой стали» по неметаллическим включениям. Часто в концепции раскисления преобладает экономическая составляющая в ущерб получению «чистой стали» и без учёта экономической эффективности до получения качественного проката или готовой продукции.

Оптимум по расходу всех отдающих материалов (раскислители, ферросплавы и шлакообразующие) в ковш определяется расчётным путём с использованием термодинамического равновесия «металл-шлак-газ» и материального баланса или теоретическим путем проведения промышленных плавов (обычно, не менее 50 плавов на одну группу марок стали). Отличие от стандартного подхода поиска оптимума заключается в том, что достаточность первичного раскисления алюминием должно быть определено по необходимому минимуму с учётом следующего. В расчёте обязательно учитывается попадание сталеплавильного шлака в ковш (обычно, от 50 до 2000 кг), вторичное окисление металла за счёт поступления кислорода из воздуха в жидкий расплав на выпуске плавки, полный химический состав всех применяемых материалов для процессов раскисления, легирования и шлакообразования. Для более точного расчёта также необходимо учесть попадание в металл и шлак всех сопутствующих материалов, например, стартовая за-

сыпка от сталевого выпускного отверстия или лётки, остаток шлака или настывль (скрапина) от предыдущих плавов на стенах и дне сталеразливочного ковша, огнеупорный материал стен, дна и зоны шлака ковша, состояние футеровки (новый ковш или из оборота) и др.

Добавление материалов на выпуске плавки в сталеразливочный ковш по мере его наполнения металлом должна быть в следующем порядке: углеродсодержащий материал, карбид кальция, алюминий (80-90 % от общей массы), все ферросплавы, шлакообразующие материалы (известь и флюс на основе Al_2O_3) совместно с оставшейся частью алюминия. Сохраняя такой порядок ввода материалов, будет одновременно обеспечена эффективная технология первичного раскисления алюминием, легирования ферросплавами и формирования жидкоподвижного шлака, способного уже в период выпуска плавки и перемещения ковша на участок внепечной обработки стали осуществлять процесс десульфурации и быстрого наведения высокоосновного шлака в ковше. Для этого следует организовать выпуск плавки в сталеразливочный ковш с одновременным вводом материалов с применением как минимум 2-х, а лучше 3-х промежуточных бункеров и отдельной механизированной подачи карбида кальция, с целью раздельного ввода отдельных групп материалов или их комбинацией, с корректной и послойной загрузкой в бункера: карбид кальция, алюминий, ферросплавы, шлакообразующие.

Первичное раскисление для «чистой стали», например, для трубных марок сталей, необходимо производить в следующем порядке: углеродсодержащий материал (расход зависит от марочного содержания углерода), карбид кальция от 0,30 до 0,65 кг/т, алюминий от 1,0 до 1,8 кг/т с CaC_2 или от 1,5 до 2,2 кг/т без CaC_2 . Точный расход карбида кальция и алюминия определяется содержанием в жидком полупродукте растворённого кислорода (от 0,0250 до 0,1350 мас. %) и указанных моментов выше.

Легирование расплава кремнием и марганцем осуществляется после предварительного раскисления металла алюминием с целью увеличить степень усвоения ведущих элементов и минимизировать формирования в шлаке оксида SiO_2 .

Шлакообразование на выпуске плавки необходимо производить отдельно от периода раскисления и легирования металла. Для шлакообразования следует применять известь и флюсы на основе Al_2O_3 . Использование флюорита на выпуске плавки не целесообразно, так как металл раскисляется алюминием и в шлаке будет достаточное содержание оксида Al_2O_3 для получения низкой температуры его плавления.

Начальное шлакообразование производится на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата (описано выше), а корректировка шлака на установках «ковш-печь» (УКП) и доводки металла (УДМ) производится за счёт небольших добавок извести, алюминиевых гранул (крупки), глинозёмсодержащих материалов или различных аналогов бокситов, флюсов (содержащие Al_2O_3). Также возможно исключение ввода глинозёмсодержащего материала на установках внепечной обработки стали, за счёт внедрения дифференцированного ввода его на выпуске из сталеплавильного агрегата в зависимости от группы марок стали.

Химический состав шлака в ковше должен обеспечивать попадания его в зону «жидких шлаков» при температурах 1550-1600 °С и содержать следующее количество оксидов (проба шлака в конце внепечной обработки стали):

- Al_2O_3 – 26-30 мас. %;
- CaO – 54-61 мас. %;
- $SiO_2 \leq 10$ мас. %;
- MgO – 4,5-8,5 мас. %;
- (сумма FeO и MnO) $\leq 1,0$ мас. %;
- $TiO_2 < 0,20$ мас. % (для марок стали, где титан не добавляется);
- целевое отношение CaO/Al_2O_3 – 1,8-2,0;
- целевое отношение $CaO/(Al_2O_3 + SiO_2)$ – 1,5-1,9.

В технологии производства «чистой стали» должна выдерживаться следующая стратегия по составу шлака: чем меньше SiO_2 , FeO и MnO, тем меньше будут формироваться оксидные неметаллические включения в стали, раскисленной алюминием. С целью исключения повышенного износа футеровки ковша и образова-

ния тугоплавкой магнезиевой шпинели ($MgAl_2O_4$) в металле не допускается содержание MgO в шлаке менее 4,0 и более 9,0 мас. % соответственно. В работе [216] также был раскрыт аспект прихода MgO в шлак из-за оборота сталеразливочного ковша, который имеет существенное влияние для нового ковша после ремонта (полная замена футеровки или замена шлакового пояса) или после длительного нахождения ковша без металла на стенде под горелкой. Эффект насыщения шлака MgO из футеровки начинает снижаться после 4-го выпуска плавки (обмыв футеровки металлом).

Выпуск плавки в ковш должен производиться с применением продувки металла аргоном через продувочные блоки сталеразливочного ковша. Продувка продолжается после выпуска плавки в течение 2 минут и более. Интенсивность продувки во время выпуска плавки должна быть на максимальном расходе аргона, суммарно на все пробки 5,0-7,5 л/т·мин. Включение и выключение подачи аргона должно производиться в автоматическом режиме. С целью исключения человеческого фактора, включение подачи аргона должно производиться в момент открытия сталевыпускного отверстия в автоматическом режиме.

Снижение попадания окисленного шлака в ковш в конце выпуска плавки из печи

Проведено исследование попадания различного количества окисленного сталеплавильного шлака в ковш во время выпуска плавки из дуговой сталеплавильной печи (ДСП-160). По контрактным данным фирмы «DANIELI», на выпуске в ковш должно попадать не более 5 кг/т шлака, в то время как по расчётным данным эта цифра может достигать 15 кг/т, а при выпуске металла «насухо» – более 15 кг/т.

Последствия повышенного содержания печного шлака в ковше [209, 222-224, 238, 245, 270, 271]:

- снижение коэффициента усвоения раскислителей и легирующих материалов, вступающих в реакцию с FeO и MnO и попавших в ковшевой шлак;
- высокое содержание в шлаке FeO и MnO приводит к повышенному общему содержанию кислорода в стали, за счёт образования включений корунда, в результате протекания окислительно-восстановительных процессов (фактически содержание общего кислорода в стали может достигать 0,0040-0,0050 мас. %);

- необходимость корректировки технологии внепечной обработки в ходе плавки, нарушение режимов раскисления, легирования и интенсивности продувки металла аргоном;

- вероятность затягивания разливочного стакана УНРС тугоплавкими неметаллическими включениями.

Следует обратить внимание на факторы, которые влияют на количество печного шлака, попавшего в ковш [209, 222-224, 238, 245, 270, 271]:

- уровень жидкого остатка в ДСП (так называемого «болота»);
- износ сталевыпускного отверстия (эркер или лётка);
- человеческий фактор.

В большинстве случаев обнаружение шлака в струе металла происходит визуально сталеваром, контролирующим процесс. Результат сильно зависит от квалификации персонала и зачастую условия процесса не позволяют точно определить момент проникновения шлака.

Оценка величины попадания шлака производилась по косвенному параметру – приросту концентрации фосфора в металле по формуле 3.1 [245, 270]:

$$\Delta[P] = [P]_{\text{УНРС}} - [P]_{\text{УКП}}, \quad (3.1)$$

где $[P]_{\text{УНРС}}$ – аттестационная проба из промежуточного ковша УНРС, мас. %;

$[P]_{\text{УКП}}$ – 1-я проба на установке «ковш-печь», мас. %.

Также в расчётах учтён прирост фосфора из ферросплавов, отдаваемых на УКП. Его вклад может находиться в диапазоне от 0,0002 до 0,0007 мас. % или более в зависимости от массы присадки ферросплавов и содержания фосфора в них.

При работе на увеличенном «болоте» доля плавов, в которых прирост фосфора от внепечной обработки до разливки на УНРС составил более 0,0020 мас. %, снизилась с 6 до 2 %. Соотнесение видеоматериалов, полученных с использованием тепловизора (рисунок 3.1) с данными по приросту фосфора показало, что работа ДСП на увеличенном остатке и выпуск плавки с минимальным количеством шлака позволяют получить прирост фосфора $\Delta[P]$ менее 0,0020 мас. %.

Согласно проведённым термодинамическим расчётам для получения «чистой стали», технология выпуска плавки должна обеспечивать попадание печного шлака не более 2,0 кг/т (целевая рекомендация) без технических средств автоматизации выпуска плавки и не более 1,0 кг/т со средствами механизации и автоматизации отсечки сталеплавильного шлака.

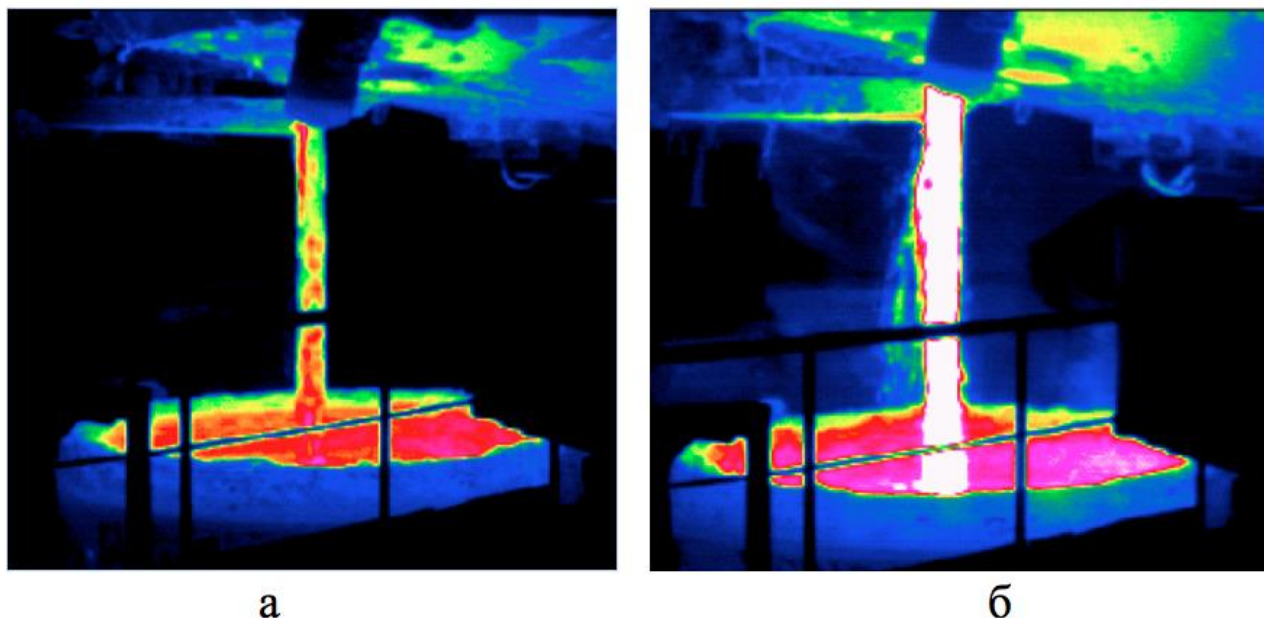


Рисунок 3.1 – Сравнение выпусков плавки с минимальным количеством шлака, попадающего в сталеразливочный ковш (а) и с повышенным количеством шлака (б)

Комплексные термодинамические расчёты в программе STM и практические примеры выпуска металла в ковше (раскисление и шлакообразование)

Произведено термодинамическое моделирование в программе STM попадания печного шлака до 31 кг/т в сталеразливочный ковш с целью определения изменения его химического состава в ковше для низкоуглеродистой (К56) и среднеуглеродистой стали (Сталь 20). Учтена актуальная технология ввода раскислителей (FeAl_{150} и CaC_2), легирующих (FeSi_{65} , FeSiMn_{17} и FeMn_{965}) и шлакообразующих материалов (CaO и Al_2O_3) для условий ЛПК. Фактические данные по материалам, схеме добавления материалов в ковш, химическому составу печного шлака, жидкого полупродукта для двух марок стали представлены в Приложении А.

Расчёт по металлу производили по теории Вагнера, расчёт по шлаку по теории Кожеурова В.А. (ТРИР). В качестве стандартных состояний элементов в металле для растворенных веществ выбрали состояние бесконечно разбавленного

раствора. В жидком шлаке выбрали за стандартное состояние «чистый жидкий компонент». Для описания газовой фазы использовали модель идеального газа. Полученные расчёты в STM представлены на рисунках 3.2 и 3.3.

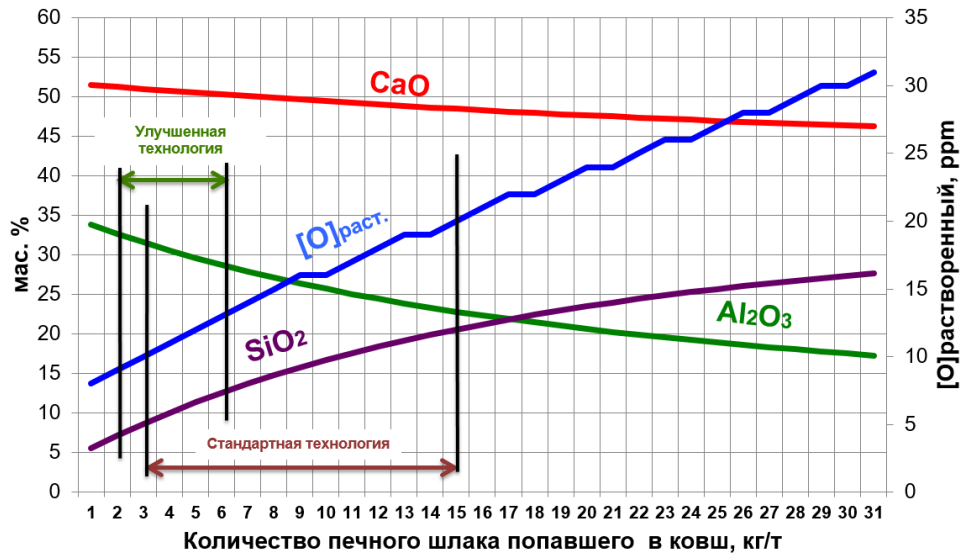


Рисунок 3.2 – Изменение состава шлака в ковше и содержание растворенного кислорода в металле в зависимости от количества попавшего пещного шлака для низкоуглеродистой стали марки K56

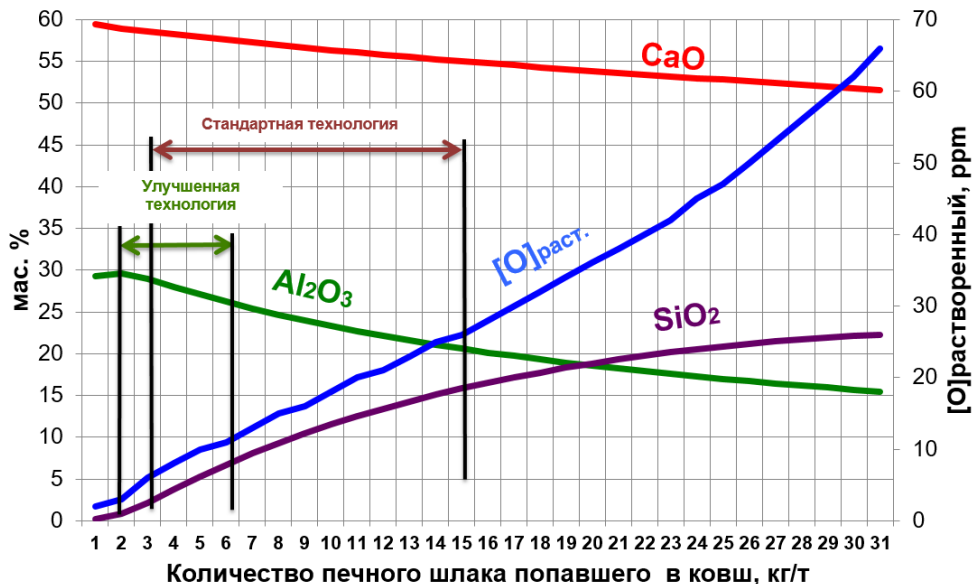


Рисунок 3.3 – Изменение состава шлака в ковше и содержание растворенного кислорода в металле в зависимости от количества попавшего пещного шлака для среднеуглеродистой стали марки 20

Работая по «стандартной технологии», когда в ковш может попасть до 15 кг/т пещного шлака, видно, что происходит снижение в шлаке Al₂O₃ и увеличение SiO₂.

Для низкоуглеродистой стали К56 с увеличением печного шлака в ковше с 3 до 15 кг/т содержание SiO_2 увеличивается с 8,5 до 20,5 мас. %, а содержание Al_2O_3 снижается с 30,0 до 22,0 мас. %. Причём содержание в металле растворенного кислорода увеличивается с 0,0010 до 0,0020 мас. %.

Аналогичная ситуация наблюдается для среднеуглеродистой стали 20. С увеличением попадания печного шлака в ковше с 3 до 15 кг/т содержание SiO_2 увеличивается с 2,0 до 15,5 мас. %, а содержание Al_2O_3 снижается с 29,5 до 20,0 мас. %, содержание в металле растворенного кислорода увеличивается с 0,0005 до 0,0025 мас. %.

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

Раздельный ввод материалов на выпуске плавки

Оптимальная технология раскисления металла на выпуске плавки позволяет стабилизировать технологию внепечной обработки стали, а также значительно снизить загрязненность стали оксидными неметаллическими включениями. Производство жидкого полупродукта в современных ДСП происходит в условиях повышенной окислительной атмосферы в рабочем пространстве печи, в результате чего выпускаемый металл насыщен растворенным кислородом (выше 0,0400 мас. %). Основными раскислителями, применяемые на выпуске плавки, являются алюминий и карбид кальция.

Технология обработки металла на выпуске плавки предусматривает ввод следующих материалов в ковш:

- раскислитель (ферроалюминий – FeAl50 , карбид кальция – CaC_2);
- ферросплавы (ферросиликомарганец – FeSiMn17 , ферросилиций – FeSi65 , ферромарганец – FeMn965);

- шлакообразующие материалы (известь – CaO , глинозёмсодержащие материалы – Al_2O_3).

По действующей технологии все материалы на выпуске плавки загружались в один расходный бункер и отдавались общим объёмом в ковш во время выпуска стали из печи, при наполнении ковша 15-20 т жидкой стали.

Данная технология не даёт возможности полностью контролировать технологический процесс, так как все материалы начинают взаимодействовать с металлом одновременно. С целью отделения процессов раскисления и легирования от шлакообразования предложена улучшенная технология отдельного ввода материалов на выпуске плавки.

Представленная схема ввода материалов на выпуске плавки (рисунок 3.4) осуществляется по следующему принципу: первоначально в ковш отдается карбид кальция и ферроалюминий для снятия переокисленности расплава (первичное раскисление), далее в металл добавляются ферросплавы, третьей порцией наводится покровный шлак и на него отдается вторая порция раскислителя (оставшиеся 10-20 % от общей массы алюминия).

Основные преимущества отдельного ввода материалов на выпуске плавки:

- процессы раскисления и легирования отделены от процесса шлакообразования, за счёт этого исключились случаи ошлаковывания материалов на выпуске плавки;

- стабилизация процесса усвоения кремния на выпуске (более 75 %);

- возможность управлять составом шлака в ковше для УКП;

- получение жидкого гомогенного шлака.

Улучшенная технология отдельного ввода материалов на выпуске плавки позволила отрегулировать химический состав шлака в ковше для последующей внепечной обработки стали. Кроме этого, с целью получения жидких шлаков, в ковше произведена корректировка расхода раскислителей и шлакообразующих материалов на выпуске плавки.

Выбраны целевые значения по отношениям CaO/SiO_2 и $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ (рисунок 3.4) и необходимые значения по содержанию в ковшевом шлаке оксидов, с целью получения температуры плавления его от 1455 до 1470 °С: $\text{CaO/SiO}_2 \geq 5,0$; $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3 \leq 1,9$; $\text{SiO}_2 \leq 10,0$ мас. %; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 24$ мас. % [209, 270, 271].

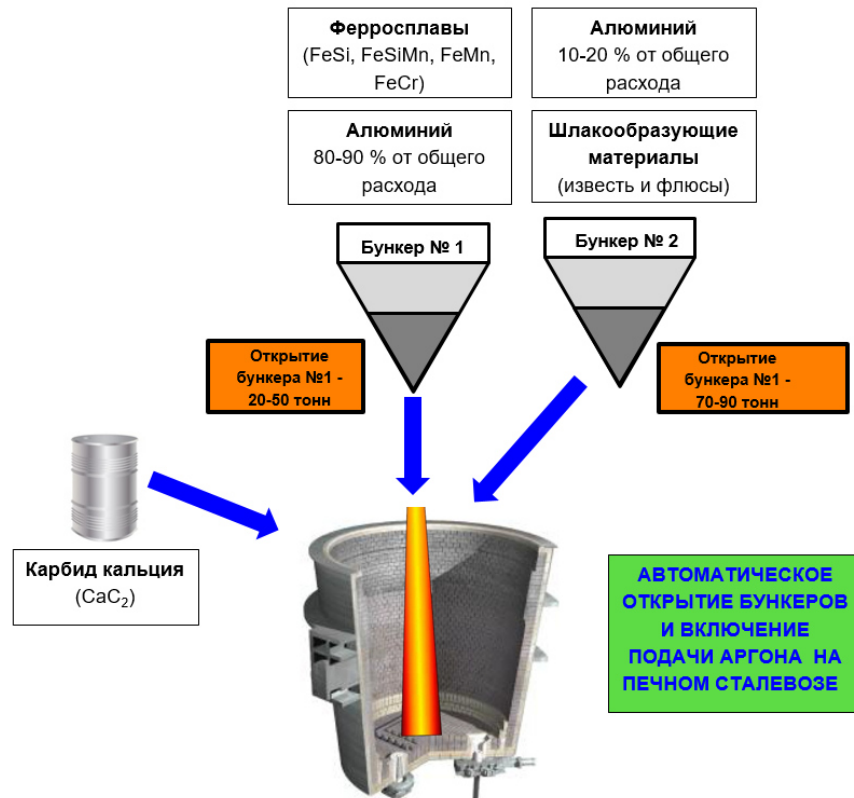


Рисунок 3.4 – Схема раздельного ввода материалов из двух бункеров на выпуске плавки из ДСП

Сравнение стандартной и оптимизированной (улучшенной) технологии шлакообразования для низко- и среднеуглеродистой стали представлено в таблицах 3.1 и 3.2. Помимо шлакообразующих материалов на выпуске плавки в ковш с металлом попадает печной шлак. В материальном балансе было принято количество попадающего печного шлака – 5,5 кг/т или 900 кг на плавку.

Из таблиц 3.1 и 3.2 следует, что состав шлака по улучшенной технологии соответствует целевому шлаку и соблюдаются отношения CaO/SiO_2 и $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$ в конечном шлаке на УКП. Вес улучшенного шлака был снижен на 200-400 кг по сравнению со стандартной технологией. При этом количестве шлака его толщина обеспечивает на УКП надежное закрытие электрической дуги.

Таблица 3.1 – Сравнение стандартной и улучшенной технологии шлакообразования в сталеразливочном ковше для стали К56

Сталь К56	«До» (стандартная технология)	«После» (улучшенная технология)
Расход материалов на выпуске плавки	FeAl-50 – 250 кг FeSiMn17 – 1334 кг FeSi65 – 380 кг FeMn965 – 1209 кг CaO – 1100 кг Al ₂ O ₃ – 250 кг	CaC ₂ – 50 кг FeAl-50 – 400 кг FeSiMn17 – 1334 кг FeSi65 – 380 кг FeMn965 – 1209 кг CaO – 800 кг Al ₂ O ₃ – 300 кг
Начальный шлак на У КП	CaO / SiO ₂ = 2,8 CaO / Al ₂ O ₃ = 3,3 Вес шлака – 2524 кг	CaO/SiO ₂ = 2,9 CaO/Al ₂ O ₃ = 1,9 Вес шлака – 2281 кг
Конечный шлак на У КП	CaO/SiO ₂ = 5,0 CaO/Al ₂ O ₃ = 3,5 Вес шлака – 3364 кг	CaO/SiO ₂ = 5,7 CaO/Al ₂ O ₃ = 1,8 Вес шлака – 3121 кг
Расход материалов на У КП	Известь – 700 кг Al _{гр} – 100 кг CaF ₂ – 150 кг	Известь – 550 кг Al _{гр} – 100 кг Al ₂ O ₃ – 250 кг

Таблица 3.2 – Сравнение стандартной и улучшенной технологии шлакообразования в сталеразливочном ковше для стали 20

Сталь 20	«До» (стандартная технология)	«После» (улучшенная технология)
Расход материалов на выпуске плавки	CaC ₂ – 100 кг FeAl-50 – 200 кг FeSiMn17 – 508 кг FeMn965 – 900 кг CaO – 1100 кг Al ₂ O ₃ – 250 кг	CaC ₂ – 100 кг FeAl-50 – 300 кг FeSiMn17 – 508 кг FeMn965 – 900 кг CaO – 800 кг Al ₂ O ₃ – 300 кг
Начальный шлак на У КП	CaO/SiO ₂ = 4,5 CaO/Al ₂ O ₃ = 3,9 Вес шлака – 2380 кг	CaO/SiO ₂ = 4,9 CaO/Al ₂ O ₃ = 2,4 Вес шлака – 2130 кг
Конечный шлак на У КП	CaO/SiO ₂ = 6,8 CaO/Al ₂ O ₃ = 3,8 Вес шлака – 3227 кг	CaO/SiO ₂ = 10,3 CaO/Al ₂ O ₃ = 1,9 Вес шлака – 2818 кг
Расход материалов на У КП	Известь – 500 кг Al _{гр} – 80 кг CaF ₂ – 150 кг SiC – 200 кг CaC ₂ – 50 кг	Известь – 400 кг Al _{гр} – 100 кг Al ₂ O ₃ – 250 кг

На тройной диаграмме состояния $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ (рисунок 3.5) представлены области состава шлака в начале и в конце обработки на УКП для стандартной технологии. Шлак на УКП имеет тугоплавкие свойства, то есть для разжижения такого шлака необходимо использовать агрессивный флюс, например, флюорит (CaF_2).

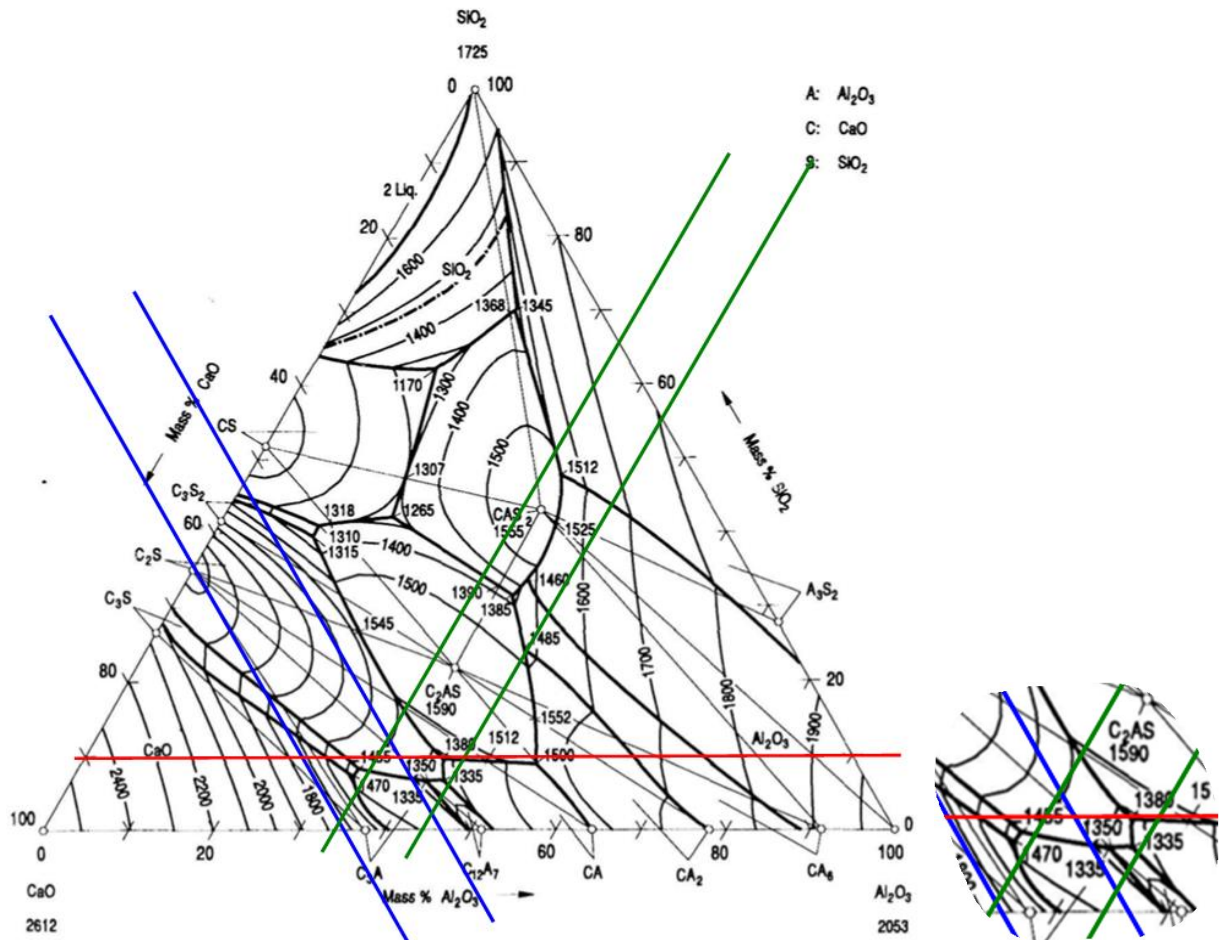


Рисунок 3.5 – Тройная диаграмма состояния $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ и увеличенная область температур плавления шлака

На тройной диаграмме состояния $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ (рисунок 3.6 и 3.7) представлены области состава шлака в начале и в конце обработки на УКП для оптимизированной (улучшенной) технологии шлакообразования в ковше. Составы конечного шлака на УКП находятся в области жидкой фазы при температуре $1600\text{ }^\circ\text{C}$, то есть применение флюорита исключается полностью.

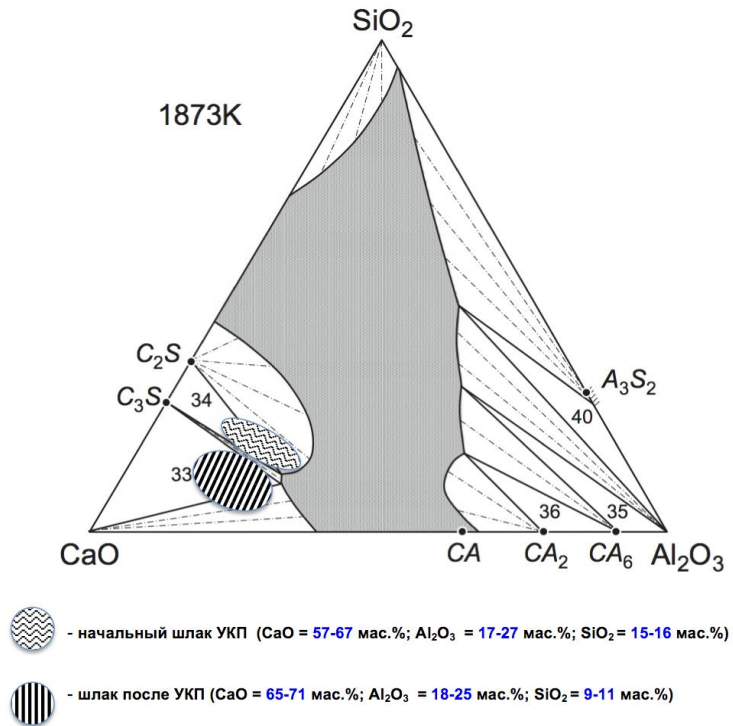


Рисунок 3.6 – Области состава шлака в ковше для «стандартной технологии»

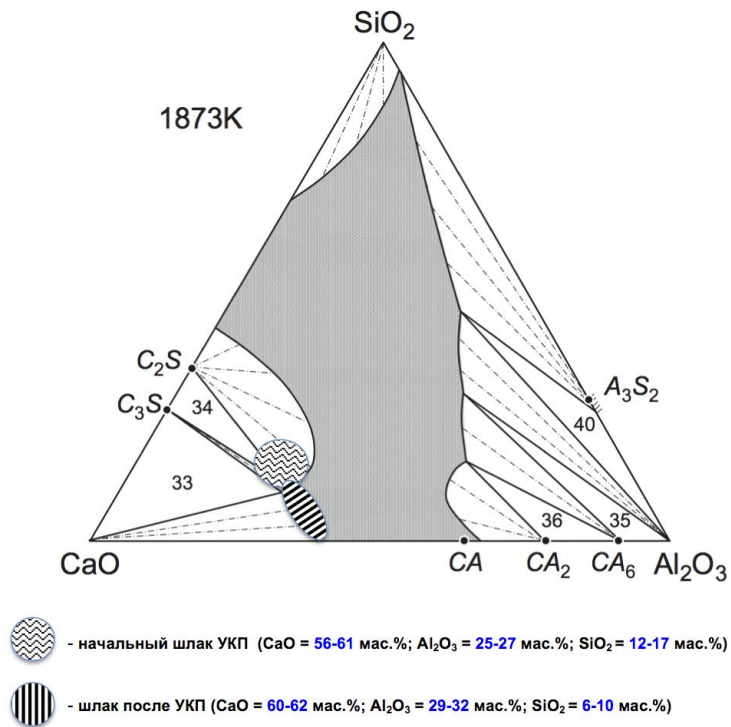


Рисунок 3.7 – Области состава шлака в ковше для «улучшенной технологии»

На основании этой работы были разработаны и реализованы следующие мероприятия для получения оптимального состава шлака в ковше без потери сульфидной ёмкости:

- улучшение первичного раскисления карбидом кальция и алюминием;
- отдельный ввод материалов на выпуске плавки в ковше;
- интенсивная продувка металла аргоном на все пробки, расходом около 6,0 л/т·мин на печном сталеводе с продолжительностью не менее 3 минут;
- исключение раскисления шлака в ковше карбидом кремния (SiC);
- улучшение десульфурации в ковше за счёт раскисления шлака алюминиевыми гранулами;
- исключение в технологии шлакообразования материалов, повышающих в шлаке содержание SiO₂ (флюорит CaF₂ и карбид кремния SiC).

Практика работы на улучшенном (оптимизированном) 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/SiO₂ и содержанием SiO₂ ≤ 10 мас. % менее активен к алюминию в металле, то есть минимальный процесс окисления алюминия до Al₂O₃;
- низкая эрозия (износ) футеровки сталеразливочного ковша за счёт исключения применения флюорита;
- расход алюминиевой катанки ниже на 20 %.

Были внедрены следующие рекомендации в технологию производства «чистой стали» по выпуску жидкого полупродукта в сталеразливочный ковш и в дальнейшую внепечную обработку стали в условиях ЛПК [222, 223].

1. На выпуске плавки и в процессе внепечной обработки металла не осуществляется замена ферросилиция на карбид кремния (SiC). Причины неприменения SiC следующие:

- карбид кремния является устойчивым химическим соединением с температурой плавления около 2600 °С по сравнению с ферросилицием 65 (около 1300 °С), что требует дополнительной энергии на его расплавление;
- в состав материалов под названием карбид кремния входит кварцевый песок (SiO₂) от 8 до 20 мас. %, что негативно сказывается на получении оптимального

шлака в ковше с низкой концентрацией SiO_2 , а в шлаке, где присутствует материал с локальной концентрацией SiO_2 , создаются окислительные условия, приводящие к загрязнению металла включениями;

- формируется гетерогенный (неоднородный) карбидный шлак в ковше, который имеет большую склонность к запутыванию в металле вследствие повышенной работы адгезии.

2. Начальная температура стали на установке «ковш-печь» (УКП) должна быть не ниже $1550\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Не производится применение карбида кальция или кремния для раскисления шлака, а также для минимизации влияния сталеплавильного шлака, попавшего в ковш. В этом случае применяются алюминиевые гранулы или их аналоги (крупка, сечка и др.).

4. Шлак в ковше должен быть жидким на протяжении всего времени внепечной обработки. Процесс шлакообразования (наведение шлака) также необходимо контролировать по цвету. Оптимальный шлак имеет белый цвет или зелёный оттенок.

На основании проделанной работы, в параграфе 3.1 была выполнена доработка программы STM и добавлен специальный раздел «Выпуск» (рисунок 3.8). Данный раздел необходим для осуществления удобных и быстрых комплексных расчётов раскисления, легирования и шлакообразования на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата (ДСП или кислородный конвертер), с учётом технологических ограничений и 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;
- ограничения по химическому составу шлака;
- ограничения по массе шлака;
- ограничения по использованию материалов.

The screenshot displays the 'Выпуск' (Release) section of the STM software. It features a top navigation bar with icons for 'Материалы', 'Равновесие', 'Автоматизация', 'Оптимизация', 'Выпуск', and 'Настройки'. The main interface is divided into several panels:

- Fixed Materials (Фиксированные материалы, кг):** A table listing materials like FeSi65, FeMn965, and FeSiMn17 with their mass, price, cost, and percentage.
- Element Constraints (Ограничения на элементы):** A table defining constraints for Mn, Si, CaO, and SiO2 based on phase and chemical composition.
- Mass Constraints (Ограничения на массы):** A table setting mass limits for FeMn965, FeSiMn17, and FeSi65.
- Calculation Parameters (Параметры):** A table showing settings like calculation time (50 ms), iterations (3), and costs.
- Fixed Materials (Фиксированные материалы, кг):** A second table listing materials like CaC2, AV91, and ШОК-80 with their mass, price, cost, and percentage.

Материал	Масса, кг	Цена, руб/т	Стоимость, руб	Доля, %
FeSi65	4 394,83	67 156,00	295 139,20	65,45 %
FeMn965	0,00	155 361,00	0,00	0,00 %
FeSiMn17	2 320,39	80 196,00	186 086,00	34,55 %
Итого добавлено	6 715,22	71 661,87	481 225,20	100 %

Имя	Фаза	Ограничение	Значение	Единицы
Mn	металл	>=	0,8	%
Si	металл	=	0,45	%
CaO	шлак	>=	49	%
SiO2	шлак	<=	10	%

Параметр	Значение
Время расчета, мс	50
Количество итераций	3
Стоимость базовая, руб	481 225,20
Стоимость расчетная, руб	205 010,65
Расчетов равновесия	13

Материал	Ограничение	Масса, кг
FeMn965	<=	500
FeSiMn17	<=	4000
FeSi65	>=	200

Материал	Масса, кг	Цена, руб/т	Стоимость, руб	Доля, %
CaC2	140,00	64 549,00	9 036,86	0,08 %
AV91 - пирамидки	200,00	99 200,00	19 840,00	0,11 %
Полупродукт Группа 1	175 000,00	1 000,00	175 000,00	98,57 %
Печной шлак Группа 1	100,00	1 000,00	100,00	0,06 %
ШОК-80	300,00	16 537,50	4 961,25	0,17 %
CaO	1 800,00	2 500,00	4 500,00	1,01 %
Итого добавлено	177 540,00	1 202,20	213 438,11	100 %

Рисунок 3.8 – Экранная форма раздела «Выпуск» в программе STM с фиксированными, переменными данными и ведёнными ограничениям по массе и химическому составу металла и шлака

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 сократилось время на расчёты для разработки технологии «чистая сталь» с 3-х дней до нескольких часов.

3.2 Разработка технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС

Совершенствование технологии аргоновой продувки стали в сталеразливочном ковше

Технология внепечной обработки стали в ковше производится продувкой инертным аргоном (аргон газообразный по ГОСТ 10157, сорт 1 или высший с массовой долей аргона должно быть не менее 99,9 %, объёмная доля водяных паров не более 0,001 об. % для температуры не выше «минус» 58 °С). Расход аргона на каждый продувочный блок должен быть примерно одинаковым. Контроль качества продувки контролируется визуально по оголенным пятнам металла в зоне продувки или с использованием специальной инфракрасной цифровой камеры или других аналогов, позволяющих оцифровать (измерить) площадь пятна продувки и фиксировать факт оголения расплава в ковше. Для отслеживания и контроля качества продувки в онлайн режиме рекомендуется на каждую продувочную пробку, на всех рабочих позициях УКП и вакууматора установить цифровые расходомеры, с возможностью передачи данных на первый уровень автоматизации цеха.

Практический пример применения термодинамического расчета в STM с целью оценки процесса вторичного окисления металла в сталеразливочном ковше

Чрезмерная аргоновая продувка жидкого расплава в сталеразливочном ковше, особенно для сталей, раскисленных алюминием, приводит к активизации процесса вторичного окисления через оголенные участки жидкого расплава, таким образом загрязняется сталь оксидными неметаллическими включениями [209].

Формирование тугоплавких шлаков с температурой плавления более 1650 °С приводит к систематическому использованию агрессивного флюса (флюорита) и повышению интенсивности аргонового перемешивания 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, см. таблицу 3.3).

Таблица 3.3 – Сравнение режимов продувки металла аргоном в ковше «до» и «после»

Режим продувки	Технологические операции	Расход аргона на один продувочный блок, л/мин	
		«До» – стандартная технология	«После» – улучшенная технология
Сильная продувка	Начальная десульфурация	800-900	500-600
Средняя продувка	Нагрев, добавление материалов, глубокая десульфурация и интенсивное охлаждение металла	400-600	200-300
Нормальная продувка	Нагрев, добавление материалов и среднее охлаждение металла	250-400	100-200
Мягкая продувка	Ввод модифицирующей кальциевой проволоки и продувка расплава без оголения зеркала	150-250	100-150
Очистительная продувка	Завершающее удаление неметаллических включений	100-200	50-100
Среднее поступление кислорода из атмосферы воздуха (подсосы) для одной плавки, кг/т		0,50-0,80	0,15-0,30

На основе расчётов в программе STM и сопоставления окисления алюминия до Al_2O_3 и интенсивности продувки, установлен максимальный допустимый уровень поступления кислорода в расплав на установке «ковш-печь» (рисунок 3.9) – не более 0,2 кг/т [222, 223]. Аналогичный расчёт поступления кислорода (подсосы) был сделан авторами работы [127] с применением программного комплекса «ГИББС», где его значение составляло от 0,8 до 4,5 кг/т. Это говорит о возможности применения расчётов в программе STM для металлургической практики.

За счёт снижения интенсивности подачи аргона, примерно на 20 % от исходного уровня, уменьшился угар и расход алюминия, и также значительно снизилось вторичное окисление металла (соответственно уменьшилось содержание оксидных включений).

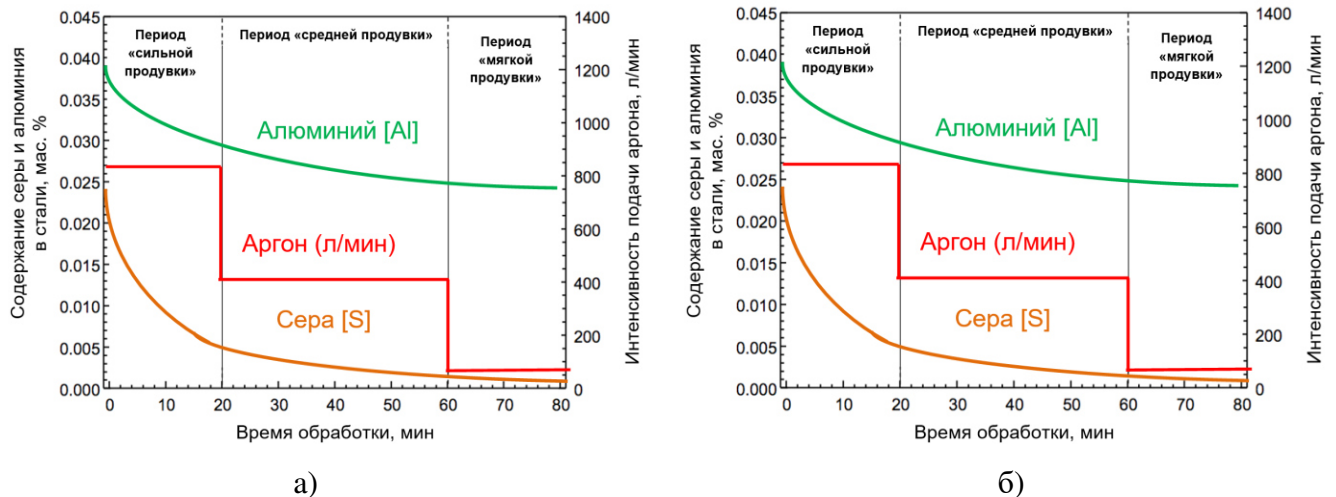


Рисунок 3.9 – Результаты термодинамического моделирования технологии внепечной обработки «до» (а) и «после» (б) в зависимости от интенсивности подачи аргона в сталеразливочный ковш

Рекомендуемое минимальное количество продувочных фурм (пробок) сталеразливочного ковша для выполнения гомогенизации расплава, эффективного удаления включений и десульфурации в зависимости от ёмкости сталеразливочных ковшей представлено в таблице 3.4 [81, 147, 149].

Таблица 3.4. – Минимальное количество продувочных фурм для соответствующей ёмкости сталеразливочного ковша

Ёмкость сталеразливочного ковша по жидкому металлу, тонн	Минимальное количество продувочных фурм, шт.
от 70 до 105	1
от 105 до 160	2
от 160 до 210	2
от 210 до 280	3
от 280 до 360	3

В случае применения на «больших» сталеразливочных ковшах количества пробок менее чем указано в таблице 3.4, получить сталь с низким содержанием включений (оксиды и сульфиды) будет проблематично.

В таблице 3.5 представлен разработанный режим продувки расплава в сталеразливочном ковше инертным газом (л/т·мин) и диаметр пятна продувки (мм) [209, 272].

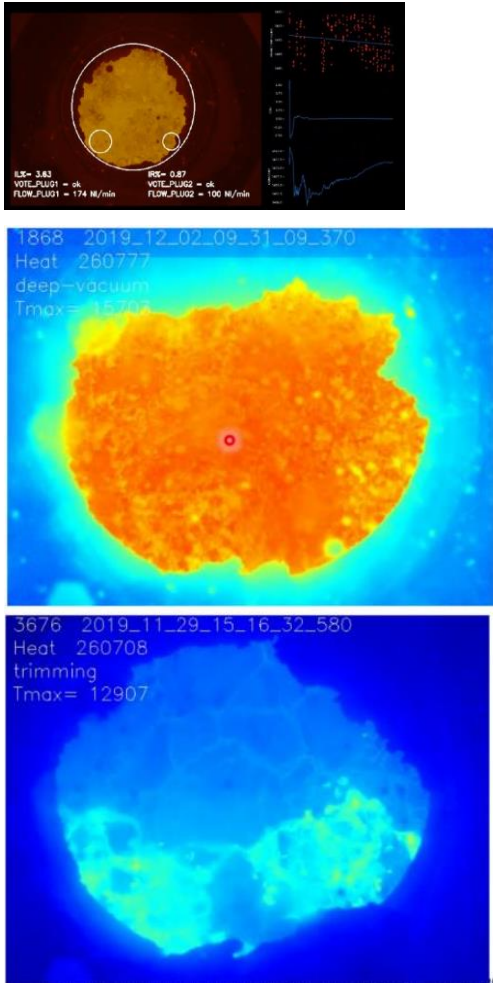
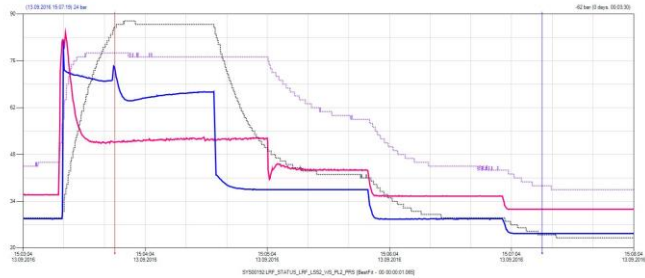
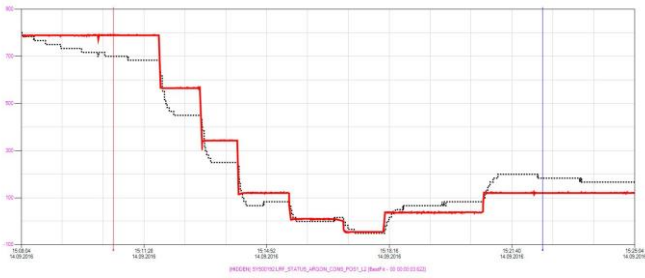
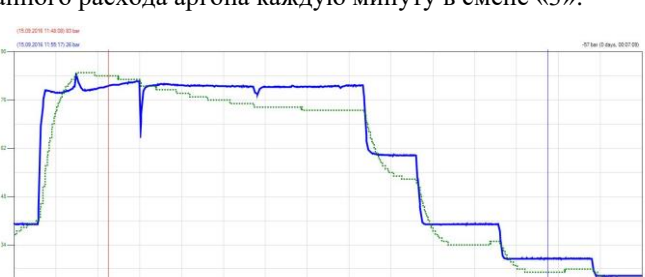
Таблица 3.5 – Режим продувки сталеразливочного ковша инертным газом для производства «чистой» и «суперчистой стали»

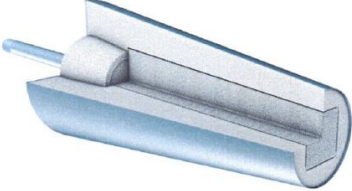
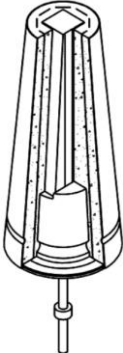
Режим продувки	Технологические операции	Суммарный расход инертного газа, л/(т·мин)		Диаметр пятна продувки, мм
		минимум	максимум	
Начало продувки	Раздув продувочных блоков до ввода алюминиевой проволоки	–	10,0	не контролируется
Сильная продувка	Начальная десульфурация	5,0	7,5	не более 400 мм
Средняя 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	

Диаметр пятна продувки определяли визуально (экспертно), в том числе были выполнены исследования равномерности работы двух пробок одновременно, человеческого фактора (отличие работы 3-х смен), износа пробок в минутах с учётом потока аргона и давления. Эти данные представлены в таблице 3.6.

В результате выполненных исследований был сделан вывод: из-за огромного числа влияющих факторов на работу пробок, следует определять диаметр пятна продувки с применением специальной комбинированной цифровой камеры (визуальная и инфракрасная съемка, см. таблицу 3.6), которую следует установить под водоохлаждаемый свод УКП или вакууматора.

Таблица 3.6 – Исследования влияния работы продувочных пробок сталеразливочного ковша с наливом жидкой стали 160 тонн

Параметр исследования	Практические данные
<p>Равномерность работы пробок и пошаговое изменение подачи аргона для сталеразливочного ковша в разных сменах (800-600-400-200-100-50 л/мин) на стали 09Г2С</p>  <p>The first image shows a top-down view of the argon blowing spot with two circular markers. It includes data: EX= 3.83, VOTE_PLU01 = ok, FLOW_PLU01 = 174 M/min, RES= 0.87, VOTE_PLU02 = ok, FLOW_PLU02 = 100 M/min.</p> <p>The second image is a thermal image of a spot with parameters: 1868 2019_12_02_09_31_09_370, Heat 260777, deep= vacuum, Tmax= 15700.</p> <p>The third image is another thermal image with parameters: 3676 2019_11_29_15_16_32_580, Heat 260708, trimming, Tmax= 12907.</p>	<p>Тренд интенсивности продувки в л/мин с уменьшением заданного расхода аргона каждую минуту в смене «1»:</p>  <p>Тренд интенсивности продувки в л/мин с уменьшением заданного расхода аргона каждую минуту в смене «2»:</p>  <p>Тренд интенсивности продувки в л/мин с уменьшением заданного расхода аргона каждую минуту в смене «3»:</p> 

Параметр исследования	Практические данные																																				
<p data-bbox="225 309 746 387">Износ пробок в минутах с учётом потока аргона и давления</p>  	<p data-bbox="772 309 1506 387">Новые пробки (время работы от 0 до 200 минут или 1 плавка):</p> <table border="1" data-bbox="884 405 1393 651"> <thead> <tr> <th>Расход аргона, л/мин</th> <th>Давление, бар</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600</td> <td>~5,4</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>4,1...5,0</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>3...3,4</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>2,6...2,7</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>2,1...2,3</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="772 707 1506 786">Средний износ пробки (время работы от 100 до 200 минут или 2-5 плавок):</p> <table border="1" data-bbox="884 804 1393 1050"> <thead> <tr> <th>Расход аргона, л/мин</th> <th>Давление, бар</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600</td> <td>8,8-8,9</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>~8</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>4,0-5,0</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>3,0-4,0</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>~2</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="772 1106 1506 1184">Изношенная пробка (время работы от 1000 до 2800 минут или 20-25 плавок):</p> <table border="1" data-bbox="884 1202 1393 1449"> <thead> <tr> <th>Расход аргона, л/мин</th> <th>Фактическое давление, бар</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600</td> <td>7,3-8,4</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>5,3-5,9</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>3,4-3,8</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>2,5-2,7</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>1,9-2,2</td> </tr> </tbody> </table>	Расход аргона, л/мин	Давление, бар	600	~5,4	400	4,1...5,0	200	3...3,4	100	2,6...2,7	50	2,1...2,3	Расход аргона, л/мин	Давление, бар	600	8,8-8,9	400	~8	200	4,0-5,0	100	3,0-4,0	50	~2	Расход аргона, л/мин	Фактическое давление, бар	600	7,3-8,4	400	5,3-5,9	200	3,4-3,8	100	2,5-2,7	50	1,9-2,2
Расход аргона, л/мин	Давление, бар																																				
600	~5,4																																				
400	4,1...5,0																																				
200	3...3,4																																				
100	2,6...2,7																																				
50	2,1...2,3																																				
Расход аргона, л/мин	Давление, бар																																				
600	8,8-8,9																																				
400	~8																																				
200	4,0-5,0																																				
100	3,0-4,0																																				
50	~2																																				
Расход аргона, л/мин	Фактическое давление, бар																																				
600	7,3-8,4																																				
400	5,3-5,9																																				
200	3,4-3,8																																				
100	2,5-2,7																																				
50	1,9-2,2																																				

Режимы мягкой и очистительной продувки обеспечивают минимальное поступление кислорода в расплав (не более 0,2 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.

Основные преимущества работы по улучшенной технологии аргоновой продувки:

- снижение расхода алюминиевой проволоки примерно на 20 %;
- прогнозируемый угар алюминия в сталеразливочном ковше;
- низкая степень загрязнения стали оксидами;
- стабильная разливка металла на УНРС.

Модифицирования неметаллических включений кальцием

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 стали кальцием, совместно с мероприятиями, исключающая процессы вторичного окисления металла в производстве. Несмотря на это, следует дополнительно обращать внимание на модифицирующую обработку металла кальцием для успешной разливки на УНРС, а также следует обеспечить низкую концентрацию серы в металле (менее 30 ppm или 0,0030 мас. %) [162, 182, 183, 272], с целью полной модификации сульфидных включений.

Целью модифицирующей обработки стали кальцием является преобразование существующих твёрдых включений типа Al_2O_3 , $CaO \cdot 6Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$ и др. в жидкие алюминаты кальция – $CaO \cdot Al_2O_3$ и $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ (рисунок 3.10). Кроме этого следует учитывать, что содержание оксида магния (MgO) в неметаллических включениях может снижать температуру плавления алюминатов примерно на 70 °C [158]. Кальций можно добавлять в жидкую сталь намеренно или непреднамеренно, когда примеры последнего возникают через ферросплавы и ковшевой шлак с высоким содержанием CaO . Неспособность достичь жидких включений посредством ввода кальция может привести к ухудшению разливки стали [129], так и самого качества металла, поскольку твёрдые алюминаты кальция и включения с высоким содержанием сульфида кальция (CaS) могут вызывать затягивания стаканов и проблемы с качеством поверхности непрерывнолитого металла и процессом разливки на УНРС (трещины, захват шлака, прорывы и др.). «Смывы» этих отло-

жений в слиток могут вызвать отклонение внутреннего качества металла. Чрезмерное добавление кальция и тем более содержание серы в металле более 0,0050 мас. % могут способствовать образованию богатых кальцием включений, которые вызывают эрозию и разрушение огнеупоров УНРС, а также смогут образовываться тугоплавкие сульфиды кальция [182, 183, 209]. В конечном итоге несовершенная технология модифицирования включений кальцием может привести к производственным потерям и нарушению технологического процесса на УНРС.

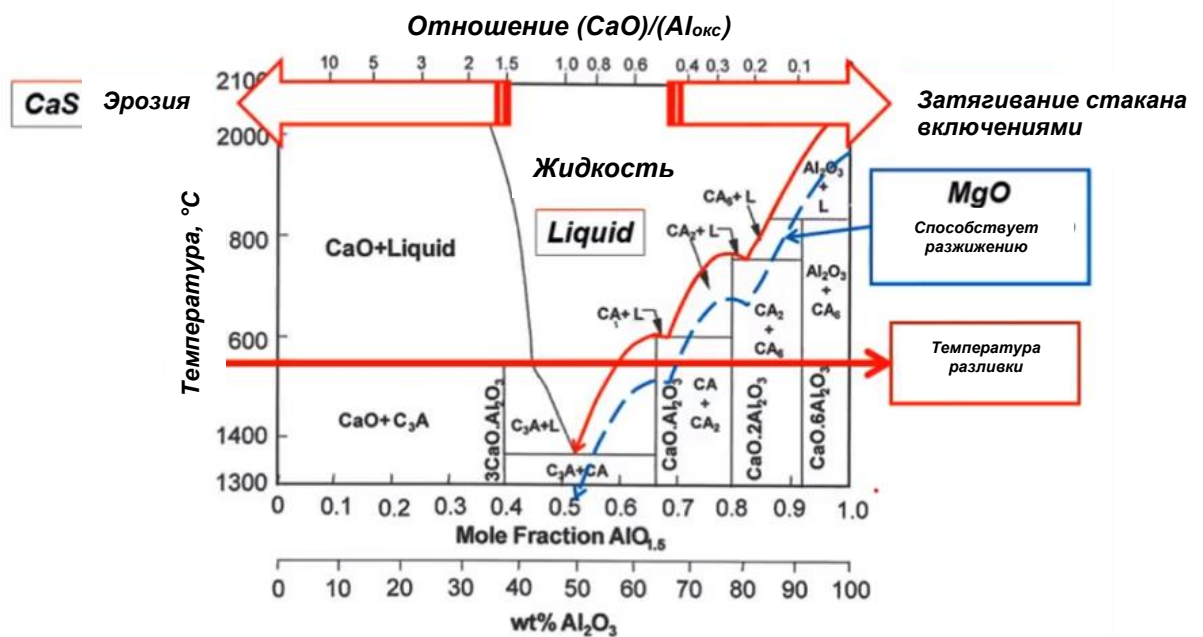


Рисунок 3.10 – Контроль неметаллических включений: обработка кальцием и модификация включений [273]

Известно, как общее содержание кислорода и серы в стали влияют на модифицирование неметаллических включений. При концентрациях кислорода (более 0,0050 мас. %) будет маловероятно, что CaS выпадет в твёрдую фазу непосредственно из расплава стали и далее продолжится накапливаться на поверхности частиц CaO-Al₂O₃. Поэтому, учитывая более высокое сродство кальция к кислороду по сравнению с серой, необходимо исключить поступление кислорода в расплав во время модифицирующей обработки стали кальцием [183]. А также следует не допускать повышенное введение кальция в расплав, которое приведёт к образованию нежелательного однофазного соединения CaO·Al₂O₃-CaS. Недостаточное введение

кальция приведёт к образованию кластерных включений оксида алюминия в дополнение к включениям MnS. Хорошая практика рафинирования в ковше и эффективная обработка кальция приводят к появлению большинства включений глинозёма, которые превращаются в жидкие алюминаты кальция и большая часть серы будет связана в виде CaS. Сульфид кальция будет осаждаться на алюминатах кальция для получения необходимой формы с целью производства «чистой стали».

На основе вышеизложенного были внесены изменения в практику производства стали, чтобы снизить вероятность образования сульфида кальция (CaS). Основные изменения заключались в снижении уровней поступающей серы и добавлении проволоки из силикокальция марки СК40. Подробный анализ показал, что жидкая фракция включений была увеличена, когда добавка проволоки CaSi была уменьшена по кальцию с 0,24 до 0,20 кг/т. Кроме этого была увеличена степень усвоения кальция с 12 до 18 %. Аналогичные результаты были получены автором работы [63]. Также реализация мероприятий по улучшению технологии десульфурации в ковше позволили снизить содержание серы в металле с 0,0030-0,0050 мас. % до уровня не более 0,0015 мас. %.

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 на 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 S и затем содержанием Ca в расплаве. То есть, чем больше этих элементов, тем больше вероятность протекания реакции с образованием CaS .

Во-вторых, в отношении $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$ 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 $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$ примерно 1,0-1,4 и далее следует определиться на практике на сколько будет снижена концентрация кальция на последней стадии внепечной обработки в ковше. $\text{Al}_{\text{окс}}$ 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 $\text{Al}_{\text{окс}}$ или Al_2O_3 в металле будет только увеличиваться. Для проверки на сколько будет увеличиваться $\text{Al}_{\text{окс}}$ и снижаться кальций, следует проводить эксперименты на практике для соответствующего производства как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах. Подобный эксперимент был выполнен 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 ($\text{Al}_{\text{пр}}$) и кальцийсодержащей ($\text{Ca}_{\text{пр}}$) проволоки, а также режимы продувки расплава согласно схеме на рисунке 3.11.

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 0,8 до 1,4, а в промежуточном ковше $[Ca]/[Al]$ от 0,06 до 0,10 или $(CaO)/(Al_{окс})$ от 0,6 до 1,0. 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 0,0100 мас. % необходимо соблюдать временные выдержки по продувке инертным газом согласно рисунку 3.11. В случае добавки алюминия в металл после вакуумирования более чем на 0,0100 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.

Реализация мероприятий модифицирования включений кальцием привело к более лучшей разливаемости стали на УНРС, то есть установлено снижение случаев затягивания разливочных стаканов тугоплавкими включениями, которые отмечаются поднятием стопора вверх (рисунок 3.12) и тем самым снижены случаи

«смывов» тугоплавких неметаллических включений с металлопроводки промежуточного ковша в слиток. Также отмечено снижение средней объемной доли включений с 0,015 до 0,010 об. % (минимум – 0,005 об. %) и дефектов трубе, связанных с неметаллическими включениями (плена и пузырь-вздутие) на 45 %.

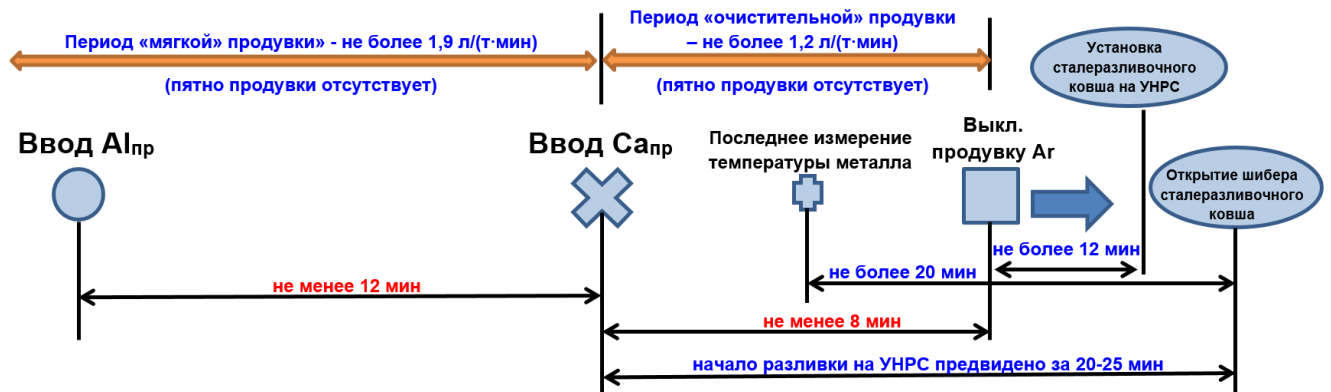


Рисунок 3.11 – Схема добавления в металл алюминия и кальция в завершающий период обработки на УКП или вакууматоре перед передачей плавки на УНРС [272]

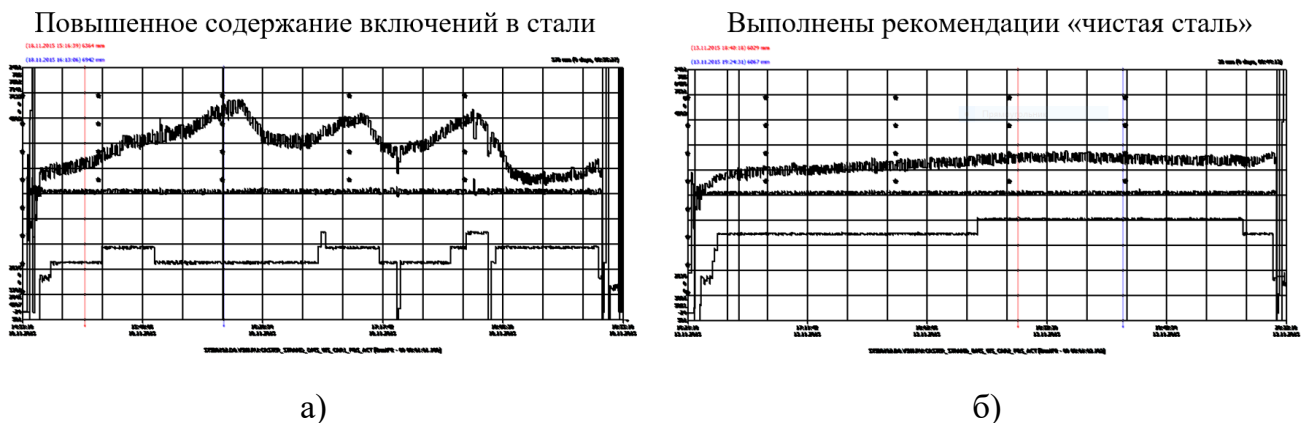


Рисунок 3.12 – График позиции стопора УНРС (верхняя линия) с затягиванием (а) и без затягивания тугоплавкими неметаллическими включениями (б)

Таким образом, было установлено 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.

Исследован фазовый состав отложений, когда отмечалось и отсутствовало затягивание разливочного стакана с применением рентгенофазового метода после размола образцов при помощи дисковой мельницы Retsch RS 200. Съёмку дифрактограмм выполняли с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV, оснащенного рентгеновской трубкой с кобальтовым анодом и высокоскоростным детектором D-teX Ultra. Напряжение и ток трубки составляли 43 кВ и 35 мА. Сканирование проводили в диапазоне углов 2θ (10-110) $^\circ$, со скоростью 2 $^\circ$ /мин и шагом 0,02 $^\circ$. Расшифровку дифрактограмм и количественную оценку фазового состава методом Ритвельда выполняли в программе PDXL с использованием баз кристаллографических данных COD-2013 и PDF2-2009. Результаты количественной оценки фазового состава и фрагменты дифрактограмм с результатами расшифровки приведены в Приложении Б.

Фазовый состав отложений, отобранных от разливочных стаканов, когда отмечалось затягивание стакана на УНРС (поднятие стопора вверх, см. рисунок 3.12), 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 разливочного стакана в слиток.

В обоих случаях была обнаружена фаза магниевой шпинели ($MgO \cdot Al_2O_3$). Присутствие магния в алюминате кальция $CaO \cdot Al_2O_3$ снижало его плавление с 1595 до 1525 $^\circ C$, что является уже не тугоплавким включением для разливки на УНРС.

Практическая польза от применения комплексного подхода разработки технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС заключается в следующем: установлены совершенные режимы аргоновой продувки стали в сталеразливочном коше и для продолжения данного направления работы следует развивать технологии цифрового зрения и контроля за пятном продувки на УКП и вакууматоре, установлено критическое поступление кислорода в расплав для производства

«чистой стали» (не более 0,20 кг/т) и уточнена технология модифицирующей обработки «чистой стали» с выдачей рекомендаций для практической реализации на металлургических предприятиях.

Следует также отметить, что одновременная (параллельная) реализация мероприятий по раскислению, шлакообразованию, продувки расплава аргоном и модифицирования включений кальцием привела к снижению удельного расхода огнеупорных материалов для сталеразливочных ковшей на 14,5 %, а также было снижено удельное число прорывов на УНРС с 1,61 до 0,46 шт./100 тыс. тонн выпускаемой продукции.

3.3 Разработка технологии разлива «чистой стали» на УНРС

Важно сохранить полученную чистоту стали по включениям в сталеразливочном ковше и во время разлива на УНРС, то есть в промежуточном ковше. Одним из основных источников загрязнения металла оксидными неметаллическими включениями является вторичное окисление стали при её движении от сталеразливочного ковша до кристаллизатора УНРС. Ко вторичному окислению относится взаимодействие расплава с кислородом воздуха, взаимодействие со шлаком промежуточного ковша и огнеупорами. 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, шлака и др. Схема вторичного окисления металла на УНРС представлена на рисунке 3.13.

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 огне-

упоров, захват покровного шлака в расплав, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш и др. В представленной работе [239] рассматриваются косвенные и прямые способы оценки именно процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше при разливке металла на УНРС. Описанные способы в большинстве своем хорошо изучены и достаточно долго применяются. Ниже будут представлены обобщения и проанализированы плюсы и минусы каждого из них, а также определены условия применения каждого способа.

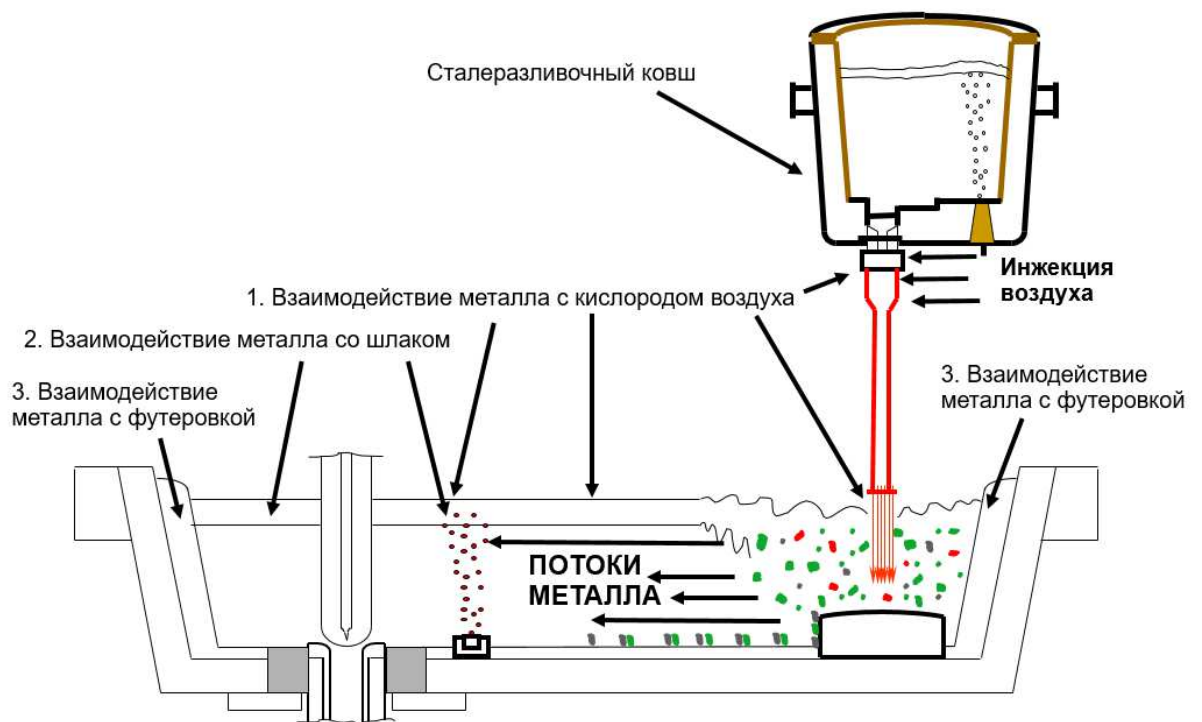


Рисунок 3.13 – Схема вторичного окисления металла на УНРС

Далее рассмотрим и оценим отдельно окисление металла через воздух, шлак и футеровку.

Окисление через воздух

Взаимодействие металла с кислородом из воздуха (инжекция воздуха) может происходить:

- через шибберные плиты и плиту-коллектор;
- через стальную обечайку коллектора (прогары стакан-коллектора);
- в стык стакан-коллектора и защитной трубы;

- поступление воздуха через оголенные участки металла и/или через укрывной шлак при недостаточной толщине;
- наполнение промежуточного ковша металлом (первая плавка в серии, первый сляб или заготовка – это самое интенсивное вторичное окисление в промежуточном ковше на серии плавов).

Взаимодействие металла с кислородом через шибберные плиты и плиту-коллектор происходит из-за эффекта создания областей пониженного давления при дросселировании шиббером сталеразливочного ковша (сильный подсос воздуха между плитами). Также разница давлений (рисунок 3.14) приводит к нагнетанию воздуха через шибберные плиты. В процессе эксплуатации шибберных плит происходит разрушение (износ) матрицы плиты (рисунок 3.15), что увеличивает инъекцию воздуха в металл через разрушенные участки плит. В этих случаях можно наблюдать насыщение металла азотом.

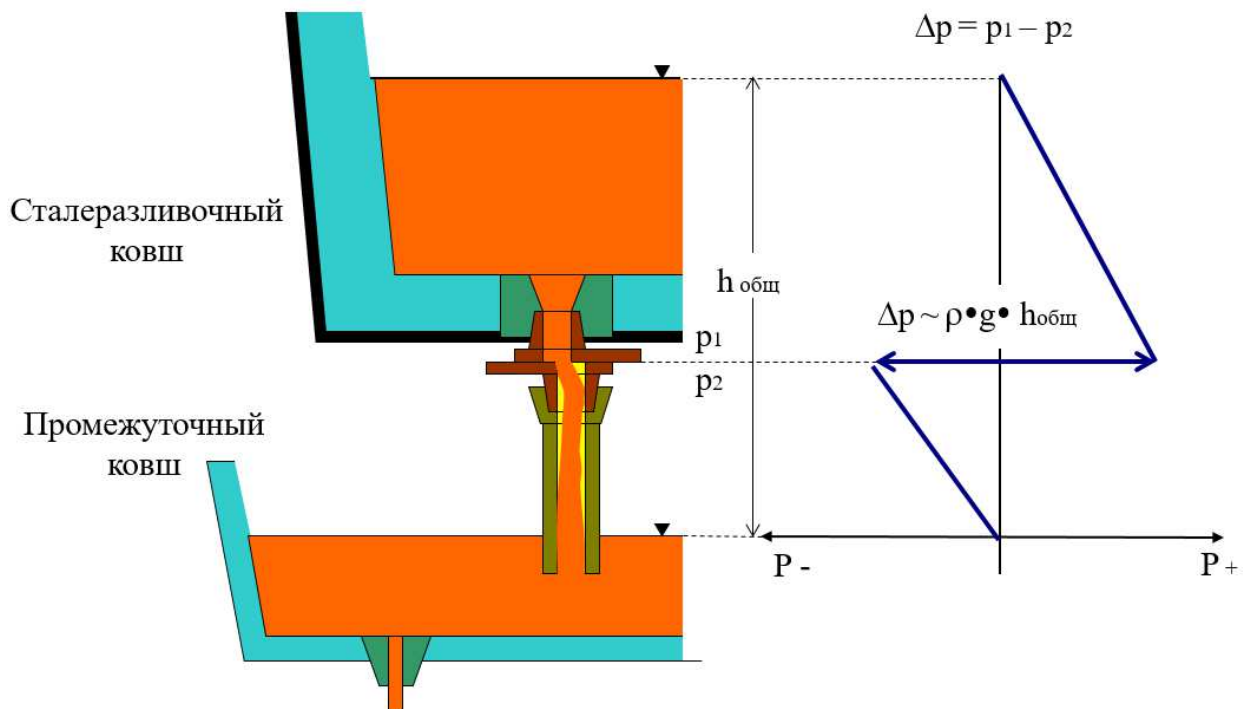


Рисунок 3.14 – Разница давлений (p) приводит к нагнетанию воздуха через шибберные плиты

где,

$h_{\text{общ}}$ – общая высота столба жидкой стали, м;

p_1 – давление жидкости на высоте сталеразливочного ковша и шибера, Па;

p_2 – давление жидкости на высоте шибера и защитной трубы, Па;

ρ – плотность жидкой стали, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$)

Величина вторичного окисления, через подсосы воздуха, может быть оценена по поглощению азота с момента последнего анализа на УКП или вакууматора, до момента отбора пробы металла из промежуточного ковша или кристаллизатора [233-235, 241]: прирост азота менее 0,0003 мас. % – герметизация хорошая, 0,0003-0,0005 мас. % – герметизация приемлемая; 0,0005-0,0007 мас. % – герметизация неудовлетворительная и при более 0,0007 мас. % – сильное вторичное окисление металла и образование тугоплавких неметаллических включений.

Также общепринято контролировать содержание алюминия: не связанного $[Al]_{к-р}$ (кислотно-растворимый) и связанного $[Al_2O_3]$ с кислородом и азотом $[AlN]$. В лаборатории на атомно-эмиссионном спектрометре определяется содержание общего и связанного алюминия и далее вычисляется количество неметаллических включений по формуле 3.2 [209, 247]:

$$[AlN] + [Al_2O_3] = Al_{общ} - [Al]_{к-р} \quad (3.2)$$

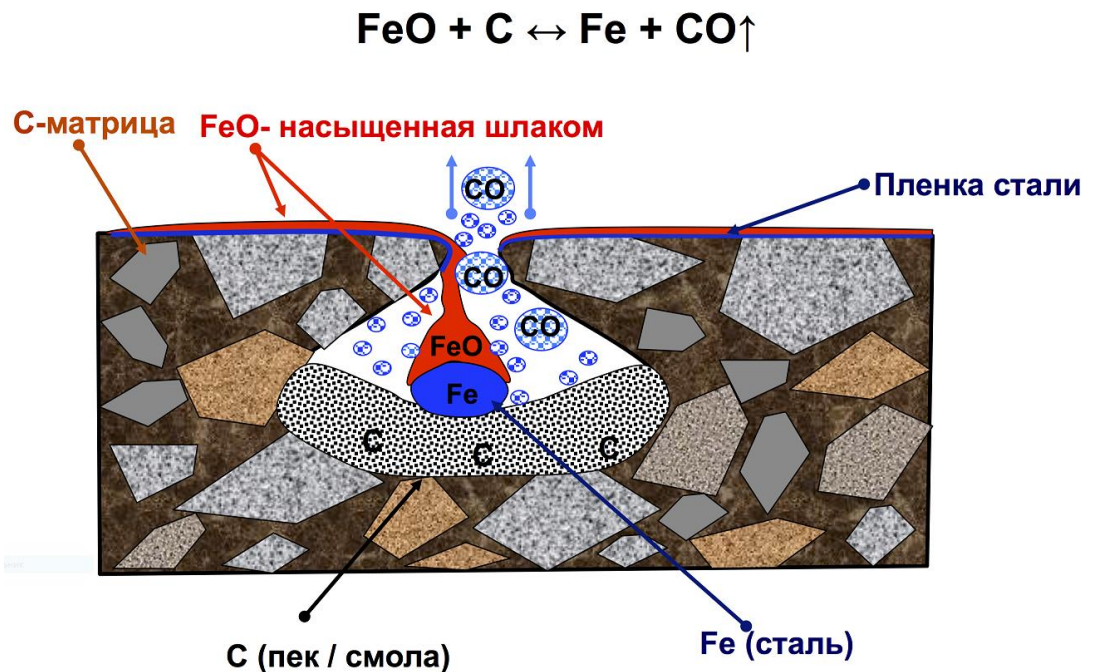


Рисунок 3.15 – Схема разрушения матрицы шиберной плиты из-за взаимодействия с оксидом железа (FeO) (инжекция воздуха при взаимодействии с жидким металлом)

В условиях ЛПК было установлено, что при стойкости шиберных плит 4 и 5 плавков увеличивается индикация по дефекту «пузырь-вздутие» (рисунок 3.16). Кроме этого, на сериях производился контроль содержания в металле азота. На тех плавках, где наблюдался прирост азота от 0,0008 до 0,0014 мас. % стойкость шиберных плит составляла от 3 до 5 плавков.

Кроме этого, насыщение металла азотом может происходить: из-за подсоса воздуха в стыковочных узлах защитной трубы с коллектором сталеразливочного ковша и при использовании съёмных погружных стаканов (тип SES – submerged entry shroud) [173, 189, 190, 209]; поглощения воздуха поверхностью открытого металла в промежуточном ковше; вовлечения воздуха незащищенной струей металла при выходе из защитной трубы до поверхности металла (нижний уровень трубы не заглублен в металл) или открытие защитной трубы над уровнем металла и шлака в промежуточном ковше.



Рисунок 3.16 – Отбраковка по дефекту «пузырь-вздутие» в зависимости от стойкости шиберных плит сталеразливочного ковша

Способы оценки процессов вторичного окисления металла

При разливке на УНРС «чистая сталь» (по оксидным неметаллическим включениям с содержанием общего кислорода менее 0,002 мас %, раскисленная алюминием) подвержена активным процессам вторичного окисления, которые можно установить по следующим 7-ми признакам.

1. Прирост концентрации азота.
2. Анализ изменения содержания химических элементов стали (Al, Si, Mn).
3. Прямой контроль содержания объёмной доли включений.
4. Содержание общего кислорода в сталеразливочном и промежуточном ковшах.
5. Контроль связанного алюминия ($Al_{окс}$) в пробе металла как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах.
6. Контроль химического состава шлака в промежуточном ковше во время серийной разливки (концентрация MnO и SiO_2).
7. Косвенное ухудшение работы шлакообразующей смеси в кристаллизаторе тонкослябовой УНРС (на поверхности металлопроката наблюдаются поверхностные дефекты металлургического происхождения).

Отдельно остановимся на пункте 3 и 7.

Прямой контроль содержания объёмной доли неметаллических включений

Согласно стандарта определения содержания включений ASTM E1245 для прямого контроля загрязнения стали неметаллическими включениями можно определить объёмную долю и размеры включений (средний диаметр (мкм) включений). Проведено исследование загрязнённости проб металла, отобранных из сталеразливочного ковша в конце внепечной обработки (на установке «ковш-печь» или вакууматор) и в пробах из промежуточного ковша, отобранных в середине разливки плавки на УНРС.

Определение содержания неметаллических включений проводили на нетравленных металлографических шлифах, изготовленных на расстоянии $2/3$ высоты пробы металла. Для повышения точности оценки анализируемая площадь должна быть не менее 200 мм^2 . Подсчёт включений проводили на металлографическом

микроскопе Axio Observer.D1m, оснащённом моторизованным предметным столом и автоматическим анализатором изображения Thixomet Pro. Объёмная доля включений рассчитывалась делением их суммарной площади на общую просмотренную площадь образца. Также рассчитывались содержание в общей объёмной доле включений размерами от 2 до 10 мкм, от 10 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм и крупнее 100 мкм. Дополнительно проведён микрорентгеноспектральный анализ включений (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Ultra-55.

В изученном массиве доля плавок, не обработанных вакуумом, составляет не более 20 %, поэтому можно сказать, что приведённые ниже результаты преимущественно характеризуют сталь, обработанную вакуумом.

Исследование показало, что на 41 % изученного массива объёмная доля включений возрастает в промежуточном ковше в 1,5-4,0 раза (зависит от марки стали и качества отбираемых проб металла). Это можно объяснить загрязнением металла в промежуточном ковше, например, за счёт реакций вторичного окисления и других процессов во время разливки металла (эрозия футеровки, захват шлака и др.). Подробно о составе включений и их распределения в металле сталеразливочного и промежуточного ковшей будет представлено в главе 5 данной диссертации.

Косвенное ухудшение работы шлакообразующей смеси в кристаллизаторе УНРС

Одной из причин ухудшения работы шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе УНРС при разливке металла, раскисленного алюминием, могут быть процессы вторичного окисления металла в промежуточном ковше. В процессе разливки из-за локального повышения содержания в металле оксидов может образовываться грубый след качания на поверхности слитка или другие дефекты на поверхности металла из-за изменения физико-химических свойств ШОС, что на практике приводит к образованию поперечной трещины и далее в прокате к дефекту «плена по следу качания». В худшем случае повышение содержания оксидов из-за окисления металла может привести к «прилипанию» корочки металла к кристаллизатору или к прорыву под кристаллизатором УНРС. Поэтому в процессе про-

изводства на УНРС необходимо в режиме реального времени осуществлять контроль за поверхностными дефектами и за процессом «прилипания» корочки слитка к кристаллизатору. Причинами данных отклонений может послужить вторичное окисление металла как через шлак, так и через кислород из воздуха.

Преимущества и недостатки способов оценки процессов вторичного окисления металла на УНРС

В таблице 3.7 представлены преимущества и недостатки каждого из рассмотренных способов оценки вторичного окисления металла на УНРС. Из представленных семи способов оценки процесса вторичного окисления металла на УНРС нет одного универсального, который определял бы полную картину окисления. Поэтому рекомендуется 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. Ниже представлены термодинамические расчёты в программе STM поступления кислорода через шлак в металл и оценены доли влияния окисления металла через воздух, шлак и футеровку на УНРС.

Окисление через шлак

Типовые оксиды шлака в промежуточном ковше ($\Sigma > 90-95$ мас. %) – CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃. Остальные оксиды (около 5-10 мас. %) – это сумма MnO+Na₂O+K₂O+Fe₂O₃+TiO₂ и др. [170]. Обычно в российской практике используют укрывные шлакообразующие смеси (ШОС), в которых содержится большая доля кислого оксида SiO₂ (более 50 мас. %), который является окислителем для стали, раскисленной алюминием. Такой химический состав шлака отрицательно сказывается на содержании общего кислорода в трубной стали даже при условии отсутствия подсосов кислорода из воздуха [233]. Также известно, что для кислых шлаков в промежуточном ковше возможен процесс ресульфурации и это особенно актуально для разливки серии плавов без отсечки ковшевого шлака.

Таблица 3.7 – Преимущества и недостатки способов оценки процессов вторичного окисления металла на УНРС

Способ оценки вторичного окисления металла на УНРС	Преимущества способа	Недостатки способа
1. Прирост концентрации азота в металле	Простота и оперативность способа. Достаточно быстро устанавливается сильное вторичное окисление через воздух.	Для установления малого вторичного окисления способ не эффективен. Высокая погрешность определения азота для атомно-эмиссионного спектрального анализа (ГОСТ Р54153), поэтому требуется производить контроль методом плавления образца в потоке аргона.
2. Анализ по изменению химических элементов в стали	Установления полной картины всех процессов вторичного окисления металла. Устанавливаются процессы окисления Mn и Al, восстановления Si и ресульфурации в промежуточном ковше.	Высокая погрешность определения Al, Si, Mn и S на атомно-эмиссионном спектрометре (ГОСТ Р54153).
3. Прямой контроль содержания объемной доли неметаллических включений	Определения чистоты стали в сталеразливочном и в промежуточном ковшах. Можно определить количество неметаллических включений как на выплавке, так и во время разливки стали. Высокая точность для глубоких исследований.	Продолжительность определения содержания включений в пробах металла. Сложность и дороговизна способа. Ошибки при определении неметаллических включений, если не стандартизирован отбор проб металла из жидкого расплава (захват шлака в исследовательскую пробу).
4. Содержание общего и растворенного кислорода	Высокая точность определения общего кислорода. Низкая стоимость и высокая скорость выдачи результатов по содержанию кислорода в металле в сталеразливочном и в промежуточном ковшах.	Требуется специальное оборудование для отбора пробы металла в инертной среде. Контроль растворенного кислорода имеет высокую погрешность и для «чистой стали» неэффективен. Необходимо иметь в лаборатории специальный газоанализатор.
5. Контроль связанного алюминия ($Al_{окс}$)	Для металла, раскисленного алюминием определяется полная картина по окислению Al, а также какой уровень чистоты металла как в сталеразливочном, так в промежуточном ковшах.	Высокая погрешность определения связанного алюминия на атомно-эмиссионном спектрометре (ГОСТ Р54153). Способ не эффективен для металла, содержащего общего алюминия менее 0,0080 мас. %.
6. Контроль химического состава шлака в промежуточном ковше	Определяются процессы вторичного окисления металла через шлак.	Ошибки в концентрациях оксидов из-за специфики отбора проб шлака (замешивание различных слоёв шлака в одну пробу). Необходимость применения специальных пробоотборников для послойного исследования шлака в промежуточном ковше.
7. Косвенное ухудшение работы ШОС в кристаллизаторе и образование поверхностных дефектов на слябе	Оперативная информация о негативном влиянии процессов вторичного окисления металла во время разливки на УНРС.	Невозможно с высокой точностью установить источники (причины) вторичного окисления металла (через воздух, шлак, огнеупоры и др.).

Важно понимать, что химический состав шлака и его физико-химические свойства во время серийной разливки на УНРС изменяются динамически из-за:

- износа футеровки промежуточного ковша (поступление MgO и образование тугоплавкой магниевой шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$);
- попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш;

- всплытие неметаллических включений в шлак;
- попадание шибберной засыпки в промежуточный ковш (обычно шибберная засыпка – это «сильный» окислитель металла из-за высокого содержания в ней SiO_2 20-40 мас. % и Fe_2O_3 10-25 мас. %);
- процессов вторичного окисления, которые изменяют химический состав шлака (увеличения концентрации оксидов железа FeO и марганца MnO);
- качество укрытия металла ШОС (человеческий фактор);
- и др.

Данные процессы на каждом производстве и в каждом цехе имеют свои особенности из-за различных условий в технологии и применяемых материалов (качество применяемых материалов и их физико-химические свойства).

Равновесные термодинамические расчёты показали, что кислые шлаки имеют тенденцию реагировать с раскисленной алюминием сталью, что приводит к восстановлению Si из SiO_2 в шлаке и окислению алюминия до (Al_2O_3) или до магнезиевой шпинели ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) [163, 170]. Вторичное окисление металла через шлак в промежуточном ковше идёт по реакции представленной на рисунке 3.17.

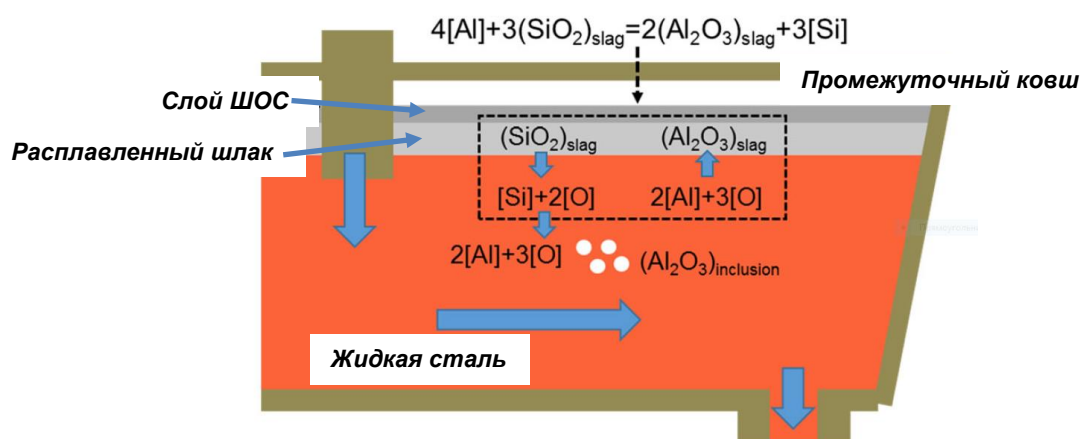


Рисунок 3.17 – Схема вторичного окисления через шлак в промежуточном ковше [234]

Протекание данной реакции на практике проявляется в виде потери алюминия и роста кремния в металле промежуточного ковша.

На предприятиях часто производят оценку вторичного окисления металла в промежуточном ковше по контролю связанного алюминия ($Al_{окс}$) в пробе металла из сталеразливочного и промежуточного ковшей. Данный способ оценки не позволяет разделить процессы окисления стали через шлак и воздух, так они в большинстве случаев протекают одновременно и параллельно.

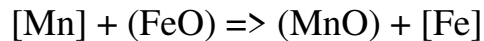
Статистика ЛПК за 19 месяцев работы показывает, что потеря алюминия $\geq 0,0060$ мас. % была зафиксирована на 8 % плавов и прирост кремния $\geq 0,0050$ мас. % на 28 % плавов. В таблице 3.8 представлено влияние прироста кремния и потери алюминия между сталеразливочным и промежуточным ковшом на дефекты «плена» и «пузырь-вздутие» в трубном цехе.

Из таблицы 3.8 видно, что влияние потери алюминия на дефекты «плена» и «пузырь-вздутие» выше чем рост кремния. Это можно объяснить следующим: изменение содержания кремния трудно установить из-за относительно высокого его содержания (по сравнению с алюминием), но данный процесс в промежуточном ковше протекает и термодинамически он возможен. На практике было установлено, что для оперативного контроля нежелательного процесса вторичного окисления через шлак, следует осуществлять мониторинг снижения Al в промежуточном ковше, которого должно быть не более 0,0060 мас. % и мониторинг прироста кремния – не более 0,0050 мас. %. В случае превышения этих показателей необходимо вмешиваться в технологический процесс для поиска причин данных отклонений.

Таблица 3.8 – Влияние потери алюминия и прироста кремния на металлургические дефекты в прокате и трубе

Период анализа данных 19 месяцев		Дефект «плена»	Дефект «пузырь-вздутие»
Потеря алюминия – dAl	< 0,0050 мас. %	0,896 %	0,519 %
	> 0,0080 мас. %	1,317 % (+ 47 %)	1,180 % (+ 127 %)
Рост кремния – dSi	\leq 0,0050 мас. %	0,866 %	0,513 %
	> 0,0080 мас. %	1,037 % (+ 20 %)	0,665 % (+ 29 %)

Для «кислого» шлака также возможно окисление марганца на границе раздела «металл-шлак» по следующей реакции [38, 73]:



Окисление марганца в «кислых» процессах выше, чем в «основных», объясняется это тем, что MnO, обладает основными свойствами. На практике на потерю марганца не обращают внимания или принимают, что процесс не установлен, так как точность определения элемента на спектрометре малая.

Окисление футеровкой промежуточного ковша УНРС

В работах [164, 201, 219] указано, что химический состав применяемых огнеупорных материалов и виды ШОС для промежуточного ковша влияют на скорость износа рабочего слоя футеровки и образование оксидных неметаллических включений.

Рабочая футеровка находится в непосредственном контакте с жидкой сталью и покровной смесью (шлаком). Выбор материала рабочей футеровки может зависит от следующего:

- требований к качеству металла по неметаллическим включениям;
- продолжительности серии плавов;
- физико-химических свойств ШОС для промежуточного ковша.

В таблице 3.9 представлены основные типы используемых торкрет-масс в современной металлургии для рабочего слоя промежуточного ковша [164, 201, 219, 241]. Использование массы с наличием оливина $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ (силикат магния и железа) в комплексе с высокоосновными ШОС приводит к повышенному износу футеровки во время разливки. Также к повышенному износу рабочего слоя промежуточного ковша может привести: попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш и повышенное содержание в шлаке SiO_2 . Минимальное количество покровного ШОС будет всегда вступать в химическую реакцию с SiO_2 в оливине с образованием таких жидких фаз как двухкальциевый силикат – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и силикат магния – Mg_2SiO_4 . Эта реакция будет протекать до тех пор, пока весь SiO_2 в огнеупорном материале не израсходуется.

Материалы футеровки «В» и «Д» (таблица 3.9) применимы для разливки «сверхчистой стали», раскисленной алюминием и титаном, из-за низкого содержания в них оксидов железа и кремния. Стоимость таких материалов дороже примерно на 50-100 % от стоимости стандартных торкрет-масс.

В условиях ЛПК используется торкрет-масса типа «А» (таблица 3.9), которая состоит из периклазовой массы на плотно-спечённом клинкере (применяется клинкерная, высокотемпературная технология обжига магнезита) без оливинов – $(Mg, Fe)_2SiO_4$. Для оценки влияния рабочей футеровки для типа «А» и «Б» на процессы окисления металла и образование дефектов металлопроката из-за неметаллических включений в ЛПК произведены серии опытных плавов при разливке с применением этих торкрет-масс.

Опытными плавками было установлено, что даже самая стойкая футеровка промежуточного ковша (тип «Б») значительно 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 через воздух и шлак. Рассчитанная доля влияния на общий процесс окисления металла менее 10 %, в среднем следует принимать – 5 %. Поэтому, в дальнейшем процесс окисления расплава на УНРС через огнеупоры промежуточного ковша (для типа «А» и «Б») 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 «В» с меньшей скоростью износа рабочего слоя или массы без MgO типа «Д» (таблица 3.9). Применение массы типа «Г» для стали раскисленной алюминием должно быть исключено из-за повышенной степени окисления металла через футеровку ковша (более 10 %).

В программе STM выполнен расчёт окисления металла через футеровку промежуточного ковша. В расчёте был учтён фактический износ футеровки за одну плавку (7 кг), которая содержит в своём составе SiO_2 – 5,0 мас. % и Fe_2O_3 – 1,0 мас. %. Поступление кислорода за плавку по расчёту составило 0,12 ppm

для принятого условия, что всё содержание оксида кремния и железа провзаимодействовало с металлом из огнеупора. Также было принято, что для практической оценки степени влияния футеровки на окисление стали провзаимодействовало от 50 до 100 % изношенного огнеупора. То есть поступление кислорода для 156 тонной плавки будет составлять от 0,06 до 0,12 ppm.

Таблица 3.9 – Химический состав материала рабочей футеровки промежуточного ковша

Тип торкрет-массы для рабочего слоя промежуточного ковша	Химический состав торкрет-массы, мас. %					Применение и скорость износа футеровки в шлаковом поясе на «кислом» шлаке, мм/ч
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	
Тип «А» – природный, спеченный агломерат	≥ 85	≤ 5,5	≤ 3,0	≤ 3,0	–	Рядовая и «чистая сталь»; ~5,4 мм/ч
Тип «Б» – низко-железистая магнезия	≈ 90,1	≈ 5,0	≈ 0,7	≈ 3,3	≈ 0,3	Рядовая и «чистая сталь»; ~3,2 мм/ч
Тип «В» – низко-железистая магнезия высшего качества	93,0-97,0	≤ 2,5	≤ 1,0	≤ 2,5	≤ 1,0	«Чистая» и «сверхчистая сталь»
Тип «Г» – высокое содержание SiO ₂	≈ 80,6	≈ 14,4	≈ 2,7	≈ 1,9	≈ 0,4	Для «кислых» шлаков и не раскисленной алюминием стали
Тип «Е» – глинозёмистая	≤ 0,2	1,0-1,8	≤ 0,3	≤ 0,3	92,5-94,3	«Сверхчистая сталь»

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

Термодинамические расчёты в STM и оценка поступления кислорода из воздуха в металл и окисление металла через шлак при разливке на УНРС

Проведен расчёт коэффициентов активности металла по параметрам взаимодействия Вагнера, расчёт коэффициентов активности шлака – по теории регулярных ионных растворов Кожеурова В.А. (ТРИР). В качестве стандартных состояний элементов в металле для растворенных веществ выбрали состояние бесконечно разбавленного раствора. В жидком шлаке выбрали за стандартное состояние «чистый жидкий компонент». Для описания газовой фазы использовали модель идеального газа.

Сложно оценить влияние подсоса воздуха и поступление кислорода в расплав. На каждом заводе доля подсосов воздуха в общий вклад процессов окисления оценивается по-разному. Например, изменили интенсивность продувки через пробку в сталеразливочном ковше на внепечной обработке стали (изменилась концентрация связанного алюминия ($Al_{окс}$) в сталеразливочном ковше) и влияние уменьшилось или увеличилось. Влияние попадающего печного шлака в ковш только за счёт раскисленности на выпуске плавки из печи или конвертера значительное (много FeO , MnO и SiO_2). Поэтому о доле влияния можно говорить только для конкретного завода или цеха, а в большинстве случаев для конкретной марки стали.

Основная трудность в расчёте заключается в том, что из всей плавки со шлаком реагирует только малая часть металла в поверхностном слое. Оценить долю реакционного слоя стали крайне затруднительно. Отбор пробы металла на химию берётся глубже и в таком случае металл однозначно не провзаимодействовал со шлаком полностью. Рассчитывали окисления алюминия и марганца, и восстановление кремния, которые были сопоставлены с фактическими данными, полученными на практике по пробам металла из сталеразливочного и промежуточного ковшей. В программе STM осуществлен подбор расчётных данных на сколько металл взаимодействовал со шлаком. Также был учтён реальный химический состав шлака в промежуточном ковше. Были приняты следующие исходные данные: площадь взаимодействия в промежуточном ковше $5,5 \text{ м}^2$ и вес шлак от 200 до 1800 кг, вес металла в ковше около 36 000 кг. В состав шлака в промежуточном ковше входит следующее: все материалы, которые отдавали в промежуточный ковш (смеси), шиберная засыпка (~20 кг за плавку), износ футеровки промежуточного ковша (~7 кг за плавку), ковшевой шлак. Учтены исходные данные по химии материалов и состав шлака в промежуточном ковше. Таким образом, вышли на значение металла, провзаимодействовавшегося со шлаком – 2 тонны. Для упрощения расчёта приняли, что 2 тонны от всей плавки (средний вес плавки – 156 тонн) вступили во взаимодействие со шлаком. Далее произведено усреднение с оставшимся металлом (154 т). Результаты оценочного расчёта приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Термодинамический расчёт изменения содержания элементов в стали в зависимости от концентрации SiO_2 в шлаке промежуточного ковша

Изменение элементов	Содержание SiO_2 в шлаке промежуточного ковша		
	50 мас. %	60 мас. %	80 мас. %
dMn, мас. %	- 0,0056	- 0,0092	- 0,0147
dSi, мас. %	0,0013	0,0024	0,0046
dAl, мас. %	–	–	- 0,0003
dO растворенный, ppm	–	–	0,30

По расчёту поступление кислорода через «кислый» шлак (SiO_2 – 80 мас. %) составило 23 ppm на 2 тонны или на всю плавку 156 тонн будет 0,30 ppm. Это не противоречит фактическому росту общего и растворенного кислорода в промежуточном ковше.

Термодинамические расчёты показывают возможность протекающих реакций окисления алюминия и 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).

В условиях ЛПК проводился дополнительный контроль содержания растворённого кислорода в сталеразливочном и промежуточном ковшах для оценки прироста растворённого кислорода или полная оценка вторичного окисления металла в промежуточном ковше. Было разлито 6 серий плавов на тонкослябовой УНРС. В процессе измерения активности кислорода было установлено, что в промежуточном ковше в среднем происходит увеличение растворённого кислорода на 0,6 ppm (0,00006 мас. %) и максимум на 1,2 ppm (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 3.18-а и 3.18-б) 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 $[Si]=0,53$ 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.

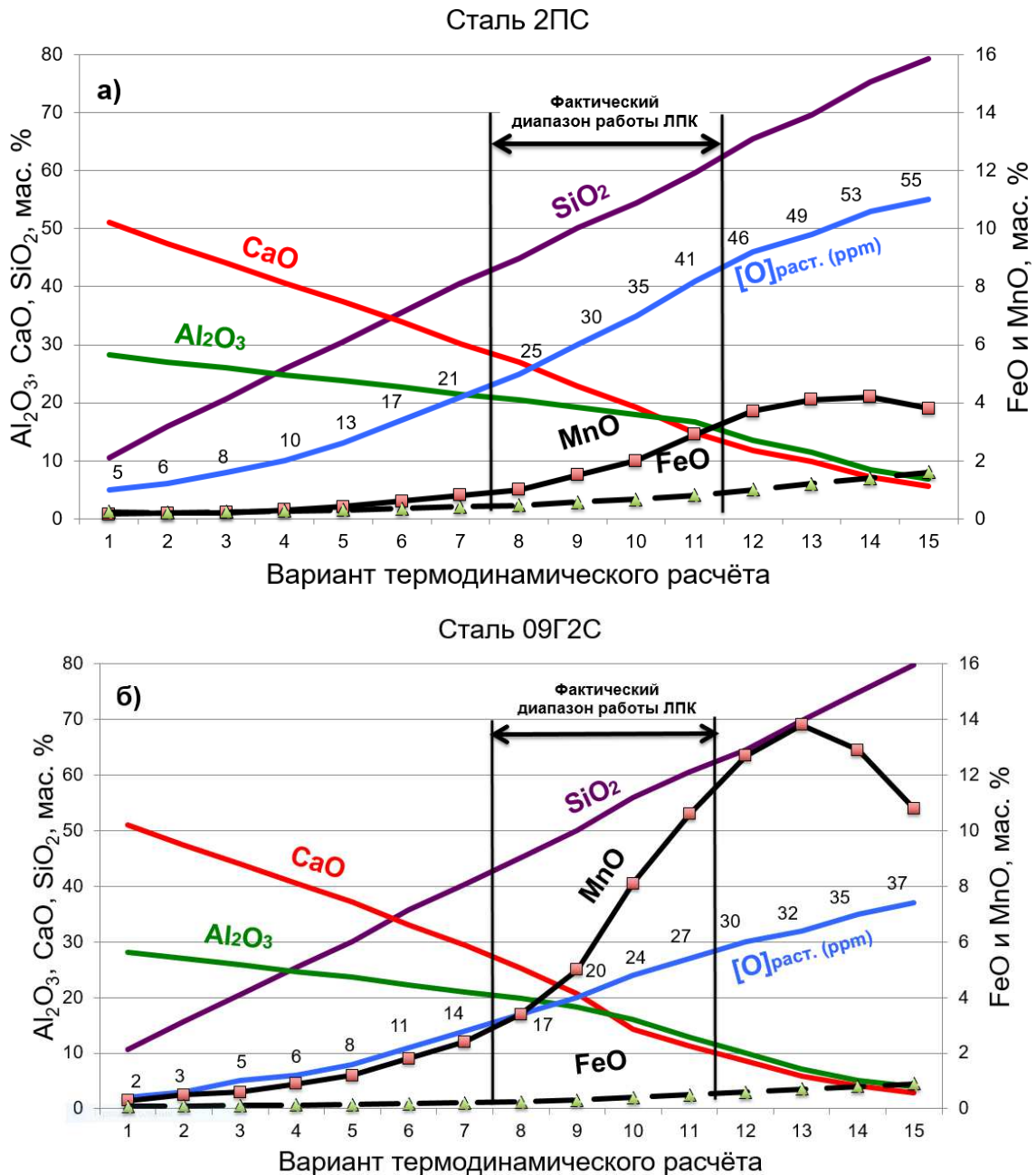


Рисунок 3.18 – Термодинамический расчёт в программе STM изменения состава шлака в промежуточном ковше и содержание растворенного кислорода в металле в зависимости от количества оксида кремния (SiO_2) в шлаке для трубных низкоуглеродистых сталей Ст2пс (а) и 09Г2С (б)

Для вариантов термодинамических расчётов 1-7 количество ковшевого шлака в промежуточном ковше составляет в материальном балансе

от 1,6 до 14,0 тонн, а для вариантов 12-15 количество теплоизолирующей смеси с концентрацией $\text{SiO}_2 > 95$ мас. % составляет от 1,1 до 3,3 тонн. Другими словами, левая часть графика – это моделирование попадания ковшевого шлака в промежуточный ковш, а правая – отсечка ковшевого шлака (исключено попадание шлака из сталеразливочного ковша).

Из расчётов видно, что с увеличением SiO_2 происходит рост FeO и MnO , а также увеличивается содержание растворенного кислорода. Отсечка ковшевого шлака (варианты расчёта 12-15) на кислом шлаке в промежуточном ковше может интенсифицировать процесс вторичного окисления металла. Для стали Ст2пс (рисунок 3.18, а) с увеличением SiO_2 с 40 до 60 мас. % содержание (MnO) увеличивается с 0,8 до 2,9 мас. % и содержание (FeO) увеличивается с 0,4 до 0,8 мас. %. Для стали 09Г2С (рисунок 3.18, б) с увеличением SiO_2 с 40 до 60 мас. % содержание (MnO) увеличивается с 2,4 до 10,6 мас. %, и содержание (FeO) увеличивается с 0,2 до 0,5 мас. %. Значительное увеличение MnO на стали 09Г2С по сравнению со сталью Ст2пс объясняется высоким содержанием в металле марганца в 5,3 раза больше. Практические данные по анализу шлаков из промежуточного ковша на стали Ст2пс показывают, что содержание MnO может быть в пределах от 1,2 до 3,0 мас. %, и на стали 09Г2С от 4 до 10 мас. %. Таким образом можно утверждать, что расчётные данные по химическому составу шлака хорошо согласуются практикой разливки на УНРС в ЛПК.

Таким образом, для получения низкого содержания общего кислорода (менее 0,0018 мас. % или поступление кислорода должно быть 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 из-за «прилипания» кристаллизующейся корочки к кристаллизатору УНРС.

Интенсификация процессов вторичного окисления металла на УНРС

С целью снижения интенсификации процессов вторичного окисления авторы работы [220] предлагают применять все возможные мероприятия по дизайну промежуточного ковша для поиска оптимальной технологии на УНРС.

На практике ЛПК в процессе освоения технологии производства «чистой стали» (содержание общего кислорода менее 0,0018 мас. %) процессы вторичного окисления металла были активизированы из-за:

- неоптимальных потоков металла в промежуточном ковше (дизайн металлоприёмника, турбулентные потоки подачи металла из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш);

- применения интенсивной продувки расплава аргоном в промежуточном ковше (замешивание «кислого» шлака с металлом и оголение зеркала металла);

- открытия защитной трубы над уровнем металла в промежуточном ковше (замешивание кислого шлака с металлом и оголение металла);

- принудительной отсечки ковшевого шлака (увеличение окислительного потенциала шлака из-за повышения доли SiO_2 с 35-45 до 60-70 мас. %);

- колебаний уровня металла в промежуточном ковше на «кислом» шлаке (снижение уровня металла в промежуточном ковше ниже 350 мм (< 20 тонн) или повышение уровня более 1000 мм);

- отбора пробы металла и шлака, измерения концентрации растворенного кислорода в металле или концентрации водорода (в процессе отбора/измерения активизируются процессы вторичного окисления металла как через шлак, так и через воздух);

- попадания в металл шибера при открытии новой плавки;

- прожигания шибера кислородом;

- и др.

Степень влияния на интенсификацию окисления металла, каждого из представленных случаев, установить на практике сложно, поэтому необходимо исключать и минимизировать все возможные процессы вторичного окисления расплава,

которые в комплексе приводят к повышению в металле общего кислорода (увеличивается доля оксидных неметаллических включений в промежуточном ковше и готовой продукции).

Термодинамические расчёты для условий ЛПК показывают, что степень процессов вторичного окисления (оцененная доля) через:

- кислород из воздуха от 30 до 80 %, в среднем – 70 %;
- шлак в промежуточном ковше от 5 до 50 %, в среднем – 25 %;
- рабочую футеровку промежуточного ковша менее 10 %, в среднем – 5 %.

В процессе непрерывной разливки доля влияния того или иного процесса окисления может как увеличиваться, так и уменьшаться за счёт применяемых технологических решений в производстве.

Таким образом, были сформулированы следующие выводы.

1. Практика работы ЛПК показывает, что процессы вторичного окисления во время разливки металла на УНРС больше всего связаны с поступлением кислорода из воздуха через металлопроводку и открытые участки расплава в промежуточном ковше, а также возможно поступление кислорода через «кислый» укрупнённый шлак.

2. В процессе разливки на УНРС рекомендуется осуществлять в режиме реального времени контроль за поверхностными дефектами (поперечные трещины или плена по следу качания) и процессом «прилипание» корочки слитка к кристаллизатору. Причинами данных отклонений могут быть процессы вторичного окисления металла как через шлак, так и через кислород из воздуха.

3. Термодинамические расчёты показывают, что процессы вторичного окисления через шлак (степень влияния – от 5 до 50 %) и поступление кислорода из воздуха (от 30 до 80 %) имеют первостепенное значение, на которое необходимо обратить внимание для дальнейшего совершенствования технологии производства особо чистых марок стали с ультранизким содержанием в металле оксидных неметаллических включений. Обобщая рассмотренные результаты практических и теоретических исследований, можно сказать, что предотвращение загрязнения стали неметаллическими включениями из-за вторичного окисления возможно только

при комплексном подходе к решению поставленной задачи.

4. Главные мероприятия по исключению и минимизации вторичного окисления металла, раскисленного алюминием, должны быть направлены на снижение процессов подсосов воздуха в металл, переход на работу ШОС для промежуточного ковша с пониженным содержанием SiO_2 и минимизацию турбулентного перемешивания металл/шлак в промежуточном ковше.

Ниже перечислены разработанные мероприятия на основе результатов выполненной работы параграфа 3.3, которые следует выполнять для разливки чистого металла на УНРС, с целью минимизации ухудшения чистоты стали по оксидным и сульфидным включениям.

1. Мероприятия, снижающие вторичное окисление металла во время разливки на УНРС:

- защита расплава от поступления кислорода из воздуха через шибберные плиты и плиту-коллектор, стальную обечайку коллектора, в стык стакан-коллектора и защитной трубы, оголенные участки металла и/или через укрывной шлак (подача аргона и организация процесса разливки металла на УНРС исключают поступление кислорода из воздуха и др.);

- применяется промежуточный ковш, который исключает оголение расплава и замешивание шлака с металлом во время серийной разливки на УНРС по технологии «плавка на плавку» или минимизирует неблагоприятные турбулентные потоки металла внутри ковша;

- внедрение мероприятий по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей и качеству стартовой смеси, исключают прожигание шиббера ковша кислородом;

- организация производства на УНРС таким образом, чтобы все технологические операции минимизировали процесс вторичного окисления (открытие трубы над уровнем шлака, отбор пробы металла и шлака, измерение концентрации водорода и растворенного кислорода, чрезмерная продувка металла в промежуточном ковше инертным газом, технология набора уровня металла в промежуточном ковше после стыковки с новой плавкой и др.);

- применяемые шлакообразующие материалы в промежуточном ковше должны не окислять металл во время разливки (для ассимиляторов SiO_2 не более или равно 10 мас. %, теплоизоляторов SiO_2 не более или равно 40 мас. %, для обоих материалов TiO_2 не более или равно 1,0 мас. %).

2. Во время разливки должно быть исключено попадание ковшевого шлака, содержащего вредный сульфид кальция (CaS). Попавший ковшевой шлак в промежуточный ковш может быть обнаружен в чистом виде в литом металле, а также может увеличивать содержание в металле как экзогенных и так эндогенных неметаллических включений (оксиды и сульфиды). Поэтому в технологии непрерывной разливки должна применяться технология автоматической отсечки ковшевого шлака в комплексе с профилированным дном сталеразливочного ковша, в период доливания плавки, которая может быть сбалансирована как по качеству (минимальное количество попавшего шлака в промежуточный ковш), так и по производительности (минимальный остаток металла в сталеразливочном ковше). Также для шлакообразующих смесей промежуточного ковша (ассимилятор и теплоизолятор) содержание серы должно быть не более 0,5 мас. %.

3. Необходимо применять стаканы типа SEN (submerged entry nozzle) для разливки «чистой стали» по неметаллическим включениям, по причине исключения дополнительного источника поступления кислорода из воздуха в металл через стык погружного стакана и стакан-дозатора.

Проведенные исследования способствуют получению новых знаний о комплексном подборе торкрет-массы и ШОС для промежуточного ковша.

Оперативная оценка защиты металла от вторичного окисления на УНРС

При разливке «чистой стали» на УНРС следует в режиме реального времени контролировать индикаторы процесса вторичного окисления по следующим показателям:

1. Прирост азота металла. Цель $< 5,0 \text{ ppm}$ ($< 0,00050$ 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 $< 0,0100$ мас. %.

3. Контроль связанного алюминия ($Al_{окс}$). Цель < 20 ppm ($< 0,0020$ мас. %).

4. Онлайн мониторинг косвенного изменения физико-химических свойств ШОС в кристаллизаторе и образование поверхностных дефектов на непрерывно-литом металле.

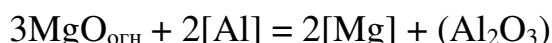
Оперативная оценка позволяет осуществлять поиск проблем в технологии производства «чистой стали» с разливкой на УНРС с целью эффективного воздействия на технологию.

3.4 Пути повышения уровня технологии по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей

В настоящее время актуально решить задачу по снижению образования неметаллических включений из-за прихода в металл магния $[Mg]$ или в шлак оксида магния (MgO). 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 ($MgO \cdot Al_2O_3$). В сталеразливочном ковше формирование этих включений обычно объясняется через взаимодействие огнеупоров с расплавом и шлаком, что в итоге приводит к образованию как эндогенных, так и экзогенных включений [208, 248]. Отрицательное воздействие магния (шпинели) в металле для электросварных труб – это негативное влияние на качество сварного шва.

Ниже представлены основные восемь химических реакций, которые влияют на формирование магниевой шпинели и неметаллических включений (НВ) при производстве трубной стали или металла, раскисленного алюминием [57]:

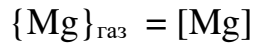
1. Восстановление магния из огнеупора алюминием из жидкой стали:



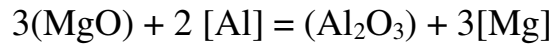
2. Восстановление магния из огнеупора углеродом (входит в состав огнеупора):



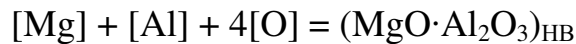
3. Конденсация газообразного магния в жидкой стали:



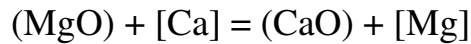
4. Восстановление MgO в ковшевом шлаке алюминием из жидкой стали:



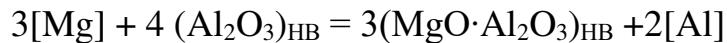
5. Химическая реакция между алюминием и магнием в жидкой стали в присутствии растворенного кислорода или поступающего кислорода в расплав (из шлака или кислород из атмосферы воздуха):



6. Восстановление MgO в ковшевом шлаке кальцием (кальций из проволоки или карбида кальция CaC_2 , например, при раскислении шлака):



7. Реакция между включениями и магнием в стали:



8. Термодинамическое равновесие системы Al-Ca-Mg-O:



С целью минимизации данных неметаллических включений, в рамках сталеразливочного ковша необходимо сконцентрироваться на следующих пяти технологических аспектов.

1. Влияние истории работы ковша: ввод в работу после ремонта футеровки или длительного нахождения ковша под горелкой без металла (обычно, более 5 часов). На данных ковшах отмечается повышенное содержание оксидных включений в готовой продукции.

2. Время нахождения металла в сталеразливочном ковше (от выпуска плавки до начала разливки) должно минимизироваться (чем меньше, тем лучше для чистоты металла по включениям).

3. Контроль и управление химическим составом ковшевого шлака и сужение границы по концентрации MgO. Шлак в ковше не должен быть сверх жидким и сверх густым. С одной стороны, когда шлак жидкий ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) < 1,3$), то возможен повышенный износ шлакового пояса ковша и загрязнение металла

включениями, за счёт увеличения поступления кислорода из воздуха в металл через шлак или оголившиеся участки металла. С другой стороны, когда шлак густой ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)>1,9$) на ковше будут образовываться тугоплавкий гарнисаж в виде шлаковой корки, который приведёт к трудностям по обслуживанию ковшей (удалению шлака из ковша после разливки, подготовки ковша для последующего приема плавки, снижение процента открытия ковшей без кислорода и неудовлетворительная работа продувочных фурм и др.) и в процессе внепечной обработки стали не будет обеспечена глубокая десульфурация и ассимиляция включений. Также густой шлак приводит к трудностям по вводу в расплав проволок с использованием трайб-аппарата.

4. Контроль за состоянием огнеупоров сталеразливочного ковша. Сюда относятся следующее: формирование шлакового гарнисажа на футеровке ковша и его своевременная очистка, недопущение локального износа шлакового пояса, контроль температуры футеровки сталеразливочного ковша перед выпуском плавки из сталеплавильного агрегата, остаточная толщина огнеупоров и др.

5. Работа продувочных фурм в сталеразливочном ковше. Различные причины неудовлетворительной продувки металла в сталеразливочном ковше должны минимизироваться с целью воспроизводимости технологии в ковше, то есть работа продувочных фурм должна быть обеспечена.

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 ковше-печи

на постоянной основе необходим контроль химического состава всех используемых шлакообразующих материалов и состава шлака на каждой плавке;

- внедрена цифровая система сбора данных по 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.

В работе [221] были представлены следующие значимые факторы для лучшего обслуживания сталеразливочного ковша:

- правильное хранение и обращение с огнеупорными материалами;
- соответствующее качество монтажа футеровки;
- своевременный ремонт стальных обечаек ковшей и деформированного кожуха сталеразливочных ковшей;
- контроль равномерного распределения температуры корпуса ковша за счёт изоляции;
- правильная сушка и предварительный нагрев ковша перед первым использованием (1-я плавка после ремонта и замены футеровки);
- последующий разогрев и температурный режим, который исключает циклические термошоки;
- исключение сильного перегрева футеровки на УКП;
- исключение механических нагрузок при перемещении ковша;

- предотвращение образования шлаковой корки или скрапины на футеровке и их своевременная очистка и удаление.

Все эти факторы требуют непрерывных контролируемых операций по производству стали, квалифицированного персонала, достаточной доступности ресурсов (персонал, время, бюджет) и опытного руководства завода для достижения успеха.

Также для металла, раскисленного алюминием, разработаны дополнительные технические требования для материалов, отдающихся в ковш (ферросплавы, раскислители, шлакообразующие, проволочки, укрывные теплоизолирующие материалы и др.), которые должны обеспечивать минимальное содержание в стали фосфора, серы и вредных элементов, и соединений, неблагоприятно влияющих на содержание в металле неметаллических включений, к ним относятся S, P, SiO₂, MgO, Ti, TiO₂, В и др. А именно, разработаны и внедрены в работу следующие документы: технические требования на глинозёмсодержащие материалы (ТТ 057574848-137-2017), карбид кальция в контейнерах и его ввод 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.

Выполнение указанных мероприятия в ЛПК привело к стабилизации концентрации MgO в ковшевом шлаке. На рисунке 3.19 представлена диаграмма концентрации MgO «до» и «после» реализации мероприятий в зависимости от номера оборота сталеразливочного ковша по ходу его стойкости. Цифра «1» означает что ковш введен в работу после ремонта футеровки или после длительного нахождения без металла на стенде под горелкой.

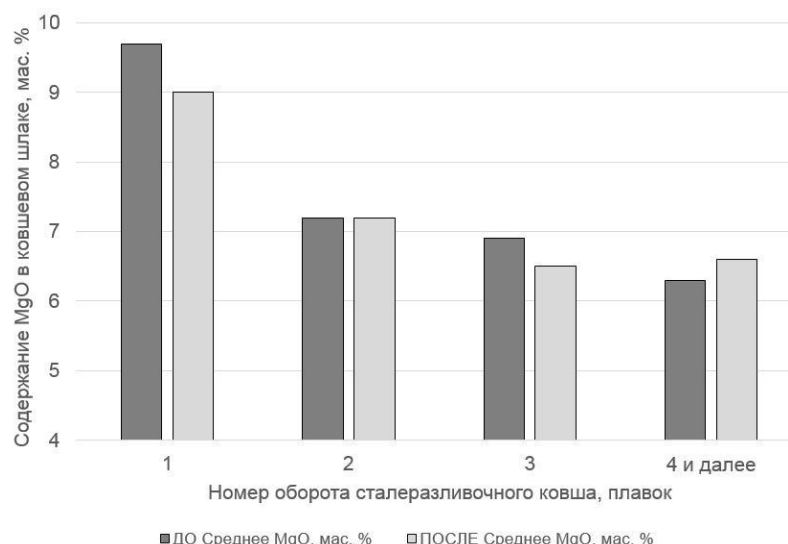


Рисунок 3.19 – Среднее содержание MgO в ковшевом шлаке в зависимости от номера оборота ковша «до» и «после» реализации мероприятий

На рисунке 3.20 и в таблице 3.1 представлена основность ковшевого шлака ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$) и химический состав шлака с 2014 по 2017 год. Представленные данные показывают хронологию стабилизации химического состава ковшевого шлака по основности шлака ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$) с 1,2-2,2 до 1,3-1,8 и сужение рабочей границы по содержанию в шлаке MgO с 4-12 мас. % до 4,5-8,5 мас. %.

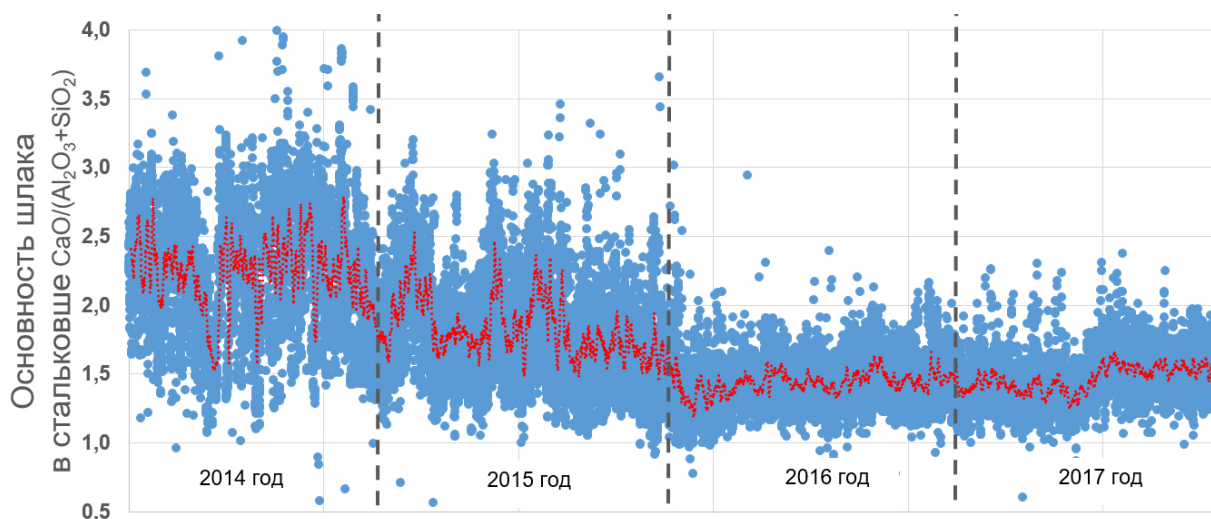


Рисунок 3.20 – Изменение основности шлака в сталеразливочном ковше с 2014 по 2017 г. (красная линия – среднее значение)

Эффективность от снижения концентрации MgO в заданных пределах и её стабилизации «до» и «после» реализации мероприятий представлена на рисунке 3.21. Для сравнительного анализа были взяты дефекты в трубе, в которых

в большинстве случаев металлографическими исследованиями обнаруживались оксиды на основе MgO, то есть сюда относится индикация неметаллических включений с использованием ультразвукового метода (УЗК) и дефект «пузырь-вздутие», который выявляется визуально после формовки трубы. Значительный эффект по снижению дефектов по неметаллическим включениям был выявлен для ковшей с оборотом «1», «2» и «3» плавки. Для номера оборота ковша «4 и более» данные брать в учёт не следует, так как количество этих плавков больше и причины образования дефектов на них не связаны однозначно с содержанием MgO в ковшевом шлаке.

Таблица 3.11 – Содержание MgO в ковшевом шлаке и основность шлака

Год	Средняя концентрация MgO, мас. %	Доля плавков с концентрацией MgO более 8,5 мас. %, %	Доля плавков с концентрацией MgO менее 4,5 мас. %, %	Средняя основность CaO/(Al ₂ O ₃ +SiO ₂) ковшевого шлака / рабочий диапазон «от и до»
2014	5,0	1,6	40,7	2,2 / 1,2-3,4
2015	5,5	3,8	22,6	1,8 / 1,1-3,0
2016	6,5	7,7	1,4	1,4 / 1,0-2,0
2017	6,2	4,4	2,7	1,5 / 1,3-1,8

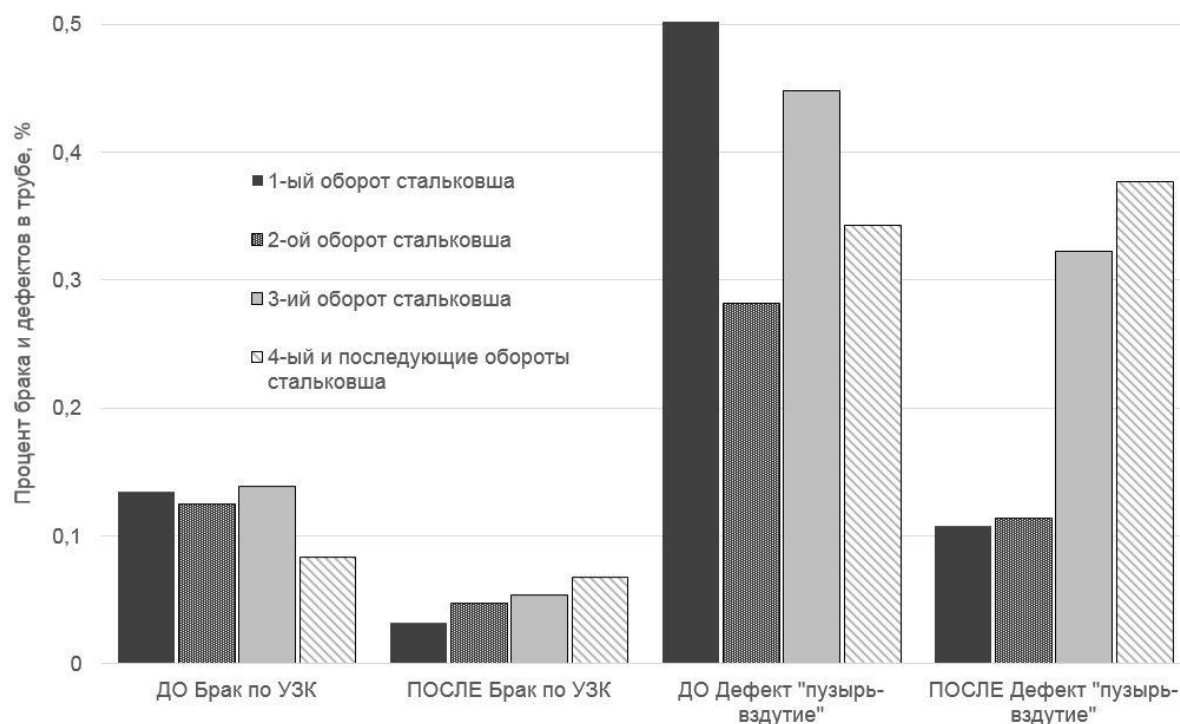


Рисунок 3.21 – Влияние номера оборота ковша на процент брака и дефектов в трубе для периода «до» и «после» реализации мероприятий в ЛПК

Все более актуальнее стоит задача перед сталеплавильщиками, производящими трубный сортамент, снижать в металле неметаллические включения, в основу которых входит не только оксид алюминия, но и оксид магния (MgO). Эти включения могут существенно снижать качество металлопродукции. Большая доля включений на основе MgO, попадающих в металл, приходится на сталеразливочный ковш и шлаковый режим на внепечной обработке стали.

3.5 Выбор параметров разделения природы образования металлургических дефектов

Применение информации, полученной от конечных потребителей по характеристикам металлопродукции, необходимо для разработки и совершенствования технологии производства «чистой стали». Как было рассмотрено в первой главе, следует решить задачу по определению условий образования металлургических дефектов, причины их возникновения, а также внести соответствующие корректировки в классификатор дефектов. Стереотипом на заводах является то, что в большинстве случаев все дефекты в сталеплавильном производстве связывают с содержанием в металле неметаллических включений.

Наиболее спорным вопросом становится выяснение причин образования визуально похожих дефектов на металле, связанных с неметаллическими включениями. Как пример, производство горячекатаных рулонов с применением «короткой» технологической схемы производства металлопроката в ЛПК АО «ВМЗ»: непрерывная разливка тонких слябов с толщиной 90,5-105 мм на УНРС (тип установки fTSC – flexible Thin Slab casting[®] – гибкая установка для отливки тонких слябов по технологии Danieli) и их прокатка в рулоны с толщиной 1,0-12,7 мм на широкополосном непрерывном стане 1950. Вся продукция ЛПК предназначена для производства труб в трубоэлектросварочных цехах Выксунского, Альметьевского трубного заводов, для производства труб малого и среднего диаметра (21-530 мм) с высокими потребительскими свойствами, а также завода «Трубодеталь» (г. Челя-

бинск). Кроме того, ЛПК производит листовой прокат для цеха труб большого диаметра и является первым и единственным заводом в России и в странах СНГ по производству горячекатаной полосы. По такой схеме у производителя металлопроката имеется информация по качеству прокатанного рулона сразу после разлива на УНРС (через 30 минут), а не через продолжительный период времени (более нескольких суток и даже месяцев), дожидаясь, когда литая заготовка или сляб будут заданы в прокатное производство. В таком исполнении технологического оборудования 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 был установлен механизм или механизмы возникновения дефектов и определены важные технологические факторы, влияющие на образование дефектов.

Самые частые дефекты, обнаруживаемые в прокате ЛПК системой PARSYTEC¹, связанные со сталеплавильным производством и разливкой [225, 246] – это трещины, плёны, раскатанные загрязнения (рисунок 3.22). 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: при изгибе сляба из вертикального положения до базового радиуса и разгибе сляба с базового радиуса до горизонтального положения. Из последних публикаций имеется ряд работ [202, 207, 235], где решались сложные задачи для выработки адекватных мероприятий на литейно-прокатных комплексах в Канаде и Нидерландах. Было установлено, что значительная часть дефектов возникает из-за нестабильности разлива на УНРС, которая может быть связана с колебанием уровня металла в кристаллизаторе, затягиванием разливочных стаканов тугоплавкими включениями, неравномерными потоками металла в кристаллизаторе и др.

¹ PARSYTEC – оптическая автоматизированная онлайн-система контроля дефектов на горячекатаной полосе с использованием 12-камер, установленных по шесть с каждой стороны полосы как сверху, так и снизу. Сбор данных осуществляется в автоматическом режиме, при этом настройка автоматического классификатора дефектов производится инженером-технологом.



Рисунок 3.22 – Распространённые поверхностные сталеплавильные дефекты на металлопрокате ЛПК, связанные с неметаллическими включениями

Процесс исследования и изучения природы дефектов металлов продолжительный, трудоёмкий и дорогой [209]. Скорее всего он будет и дальше применяться для поиска причин возникновения дефектов и разработки мероприятий по корректировке технологии производства «чистой стали», но для более глубоких исследований. В начале образцы с дефектом изучаются визуально, невооруженным глазом, а затем исследуются под оптическим микроскопом, чтобы понять морфологию дефекта. Этого недостаточно, так как есть схожие дефекты с разной природой образования, например, плена, для которой требуется применять электронный микроскоп с целью проведения микрорентгеноспектрального анализа и поиска возможных включений. Также применяется травление образцов для детального изучения под микроскопом изменения микроструктуры и размера зерна. На основании этих исследований предложено разделять дефект «плена» на три типа согласно рисунку 3.23: тип 1 – плена из-за неметаллических включений; тип 2 – плена из-за трещин на поверхности непрерывнолитого металла; тип 3 – плена, формирующаяся в процессе деформации (проката). Данное разделение плены позволяет исключить

грубые ошибки по разработке корректных мероприятий, минимизации и исключению этого дефекта.

Плена № 1 на металлопрокате из-за неметаллических включений определяется металлографическим способом с обнаружением таких элементов, как Ca, Al, Mg, Zr, Na, K, F, Si, Ce, La, Ti. Как правило, такой дефект может располагаться хаотично на полосе и его проблематично спрогнозировать и полностью исключить во время производства.

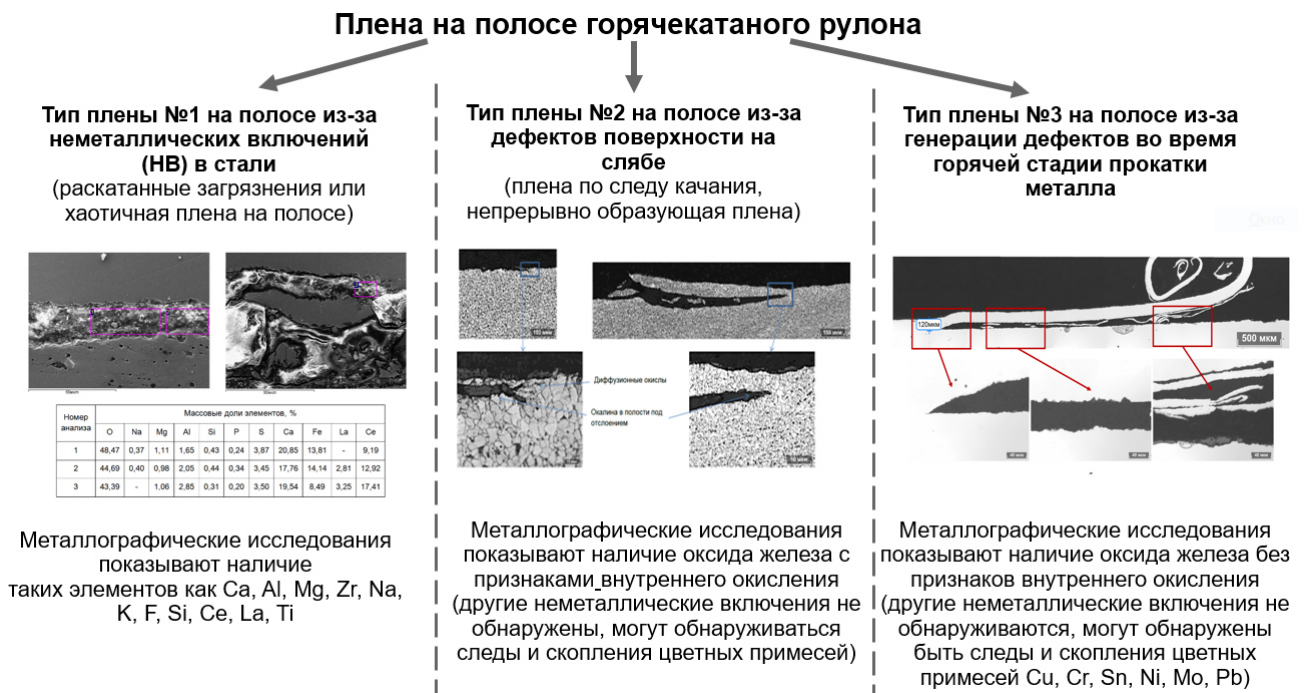


Рисунок 3.23 – Разделение дефекта плены на три типа с учётом её природы образования

Плена № 2 на металлопрокате из-за дефектов поверхности на слябе. Данный дефект связан с образованием трещин. В зоне дефекта обнаруживаются следы внутреннего окисления железа с окалиной и не обнаруживаются химические элементы как для плены № 1. Данный дефект формируется во время разлива металла на УНРС (кристаллизация слитка, охлаждение в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), разгибе сляба с базового радиуса до горизонтального положения и пр.) и при нагреве сляба до температуры около 1150-1200 °С в туннельной печи происходит внутреннее окисление железа в трещине. Схема трансформации дефекта из литого металла в прокат представлена на рисунке 3.24. Данная плена располагается

на определенном расстоянии от края полосы и имеет линейный характер или некую периодичность.

Плена № 3 на металлопрокате из-за формирования дефектов во время горячей стадии прокатки металла. Металлографическим способом может быть выявлена окалина и не обнаружены следы внутреннего окисления как для плены № 2 и химические элементы (включения) для плены № 1, то есть дефект формировался на этапе горячей прокатки. Частая причина данного типа плены – это прокат металла с оставшейся окалиной.

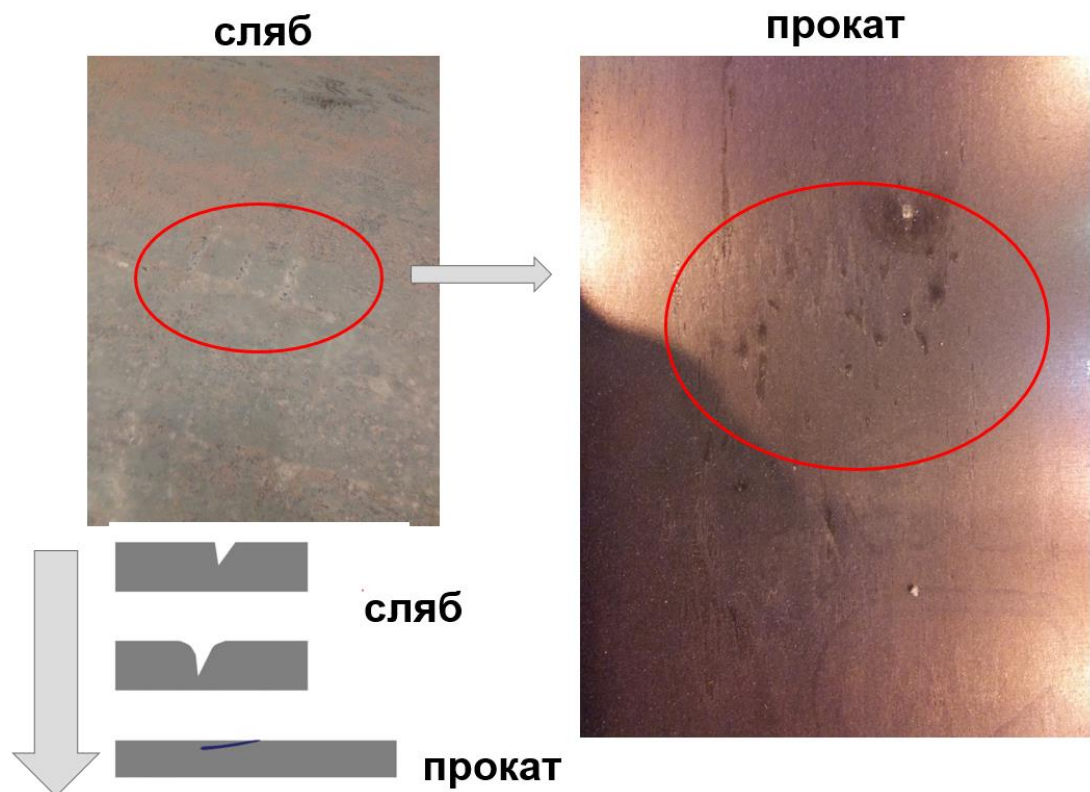


Рисунок 3.24 – Трансформация дефекта из сляба в рулонный прокат

В прокатных цехах при производстве сварных труб из горячекатаных рулонов ЛПК 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) и др. На рисунке 3.25 представлены общие виды дефектов в трубе из-за неметаллических включений.

В Приложении В представлена обновлённая информация для классификатора дефектов, связанных с неметаллическими включениями (рисунки: 3.23, 3.24 и 3.25), которые были рекомендованы к применению в АО «ВМЗ» (КДФ.20-63.959.168), а также могут применяться и на других предприятиях. Добавлено в Приложение В новая информация о факторах и технологических параметрах, влияющих на образование и развитие дефектов, а также их трансформацию в процессе прокатки и предлагаемые способы предупреждения (рекомендации и мероприятия). Кроме этого в Приложение В добавлен дефект плена «прокатная» с целью однозначного разделения дефектов, не связанных со сталеплавильным производством и неметаллическими включениями.

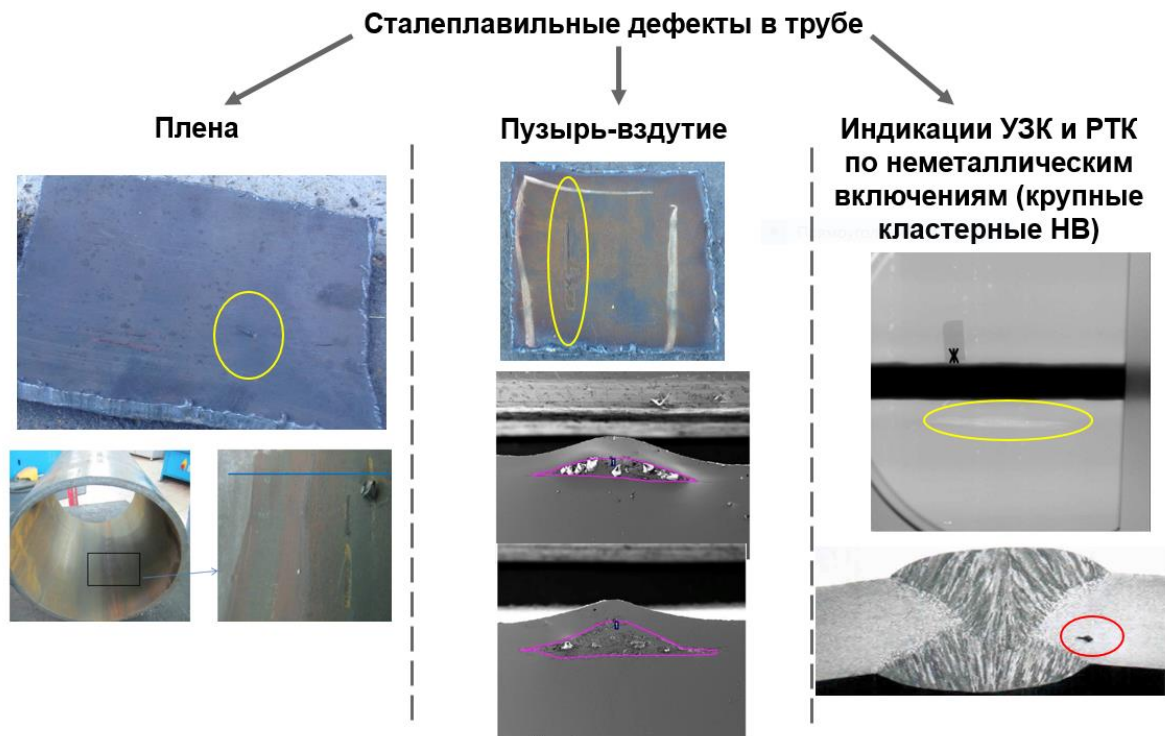


Рисунок 3.25 – Распространённые сталеплавильные дефекты в трубе из-за неметаллических включений

По природе образования, по внешним и металлографическим признакам дефекты разделены на: дефекты сталеплавильного происхождения, 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.

Для сталеплавильных дефектов характерны следующие признаки:

- одиночное расположение на поверхности металлопроката дефектов, связанных с качеством стали и периодическое расположение дефектов, связанных с разливкой на УНРС;
- наличие неметаллических включений в области дефекта;
- наличие широкой обезуглероженной зоны вблизи дефекта.

Для прокатных дефектов характерны следующие признаки:

- симметричное расположение дефекта на поверхности проката;
- периодичность расположения дефекта на поверхности проката;
- наличие вблизи дефектов аномального характера течения металла;
- различная степень деформации отдельных участков металла вблизи дефекта.

Исследование причин образования раскатанной поперечной трещины по следу качания кристаллизатора

Обнаружение дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания» производилась с использованием оптической автоматизированной онлайн-системы контроля PARSYTEC. Съёмка производилась с помощью двенадцати камер, установленных по шесть с каждой стороны полосы как сверху, так и снизу. Сбор данных осуществлялся в автоматическом режиме, при этом тщательный осмотр и обучение автоматического классификатора дефектов производил инженер-технолог.

Было установлено, что больше всего дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания» образуется на стали 20. В среднем на стали 20 количество рулонов с таким дефектом может составлять 7-10 %.

Анализ показал, что, во-первых, дефект расположен только со стороны малого радиуса (верх полосы), во-вторых, в большей степени этому дефекту подвержены рулоны шириной более 1350 мм и толщиной более 5 мм. Доля таких рулонов с дефектом составляет 14-20 % от числа прокатанных на эти размеры. В меньшей

степени этим дефектом поражены рулоны шириной более 1350 мм и толщиной проката менее 5 мм. Их доля около 5 % от числа прокатанных на эти размеры. Очевидно, они выкатываются при производстве тонкого проката. Рулоны шириной менее 1350 мм и толщиной менее 5 мм не имеют таких дефектов, что может быть связано как с более высокой температурой поверхности сляба в зоне разгиба, так и с выкатыванием дефектов при прокатке.

Выполненные металлографические исследования выявили у всех дефектов наличие обезуглероженного слоя и строчки диффузионных окислов. Это говорит о том, что трещина образовалась до туннельной печи, то есть на поверхности сляба до прокатки.

В сечении дефекты представляют собой тонкие разветлённые несплошности, заполненные окалиной и распространяющиеся под углом к поверхности на глубине около 120 мкм. Вдоль дефекта микроструктура полностью обезуглерожена с ростом ферритного зерна. Аномального характера течения металла, характерного для дефектов прокатной природы происхождения, не обнаружено. По контуру дефекта расположены мелкие диффузионные окислы, определяющие высокотемпературное формирование дефекта. Скоплений неметаллических включений в дефектной зоне не наблюдается (рисунок 3.26).

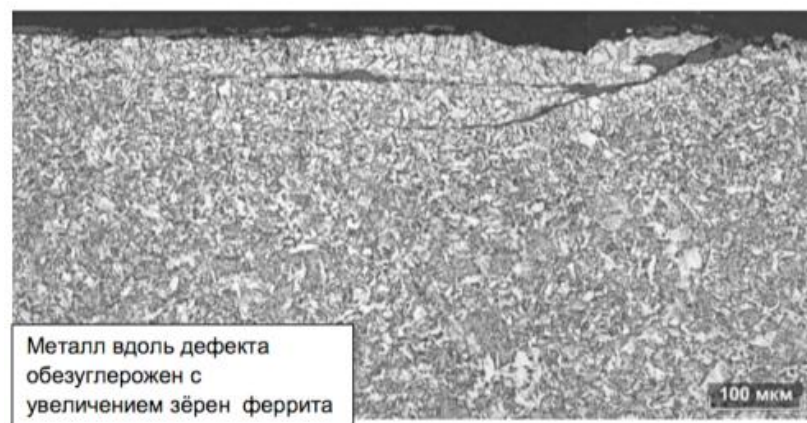


Рисунок 3.26 – Микроструктура по месту дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания» на стали 20

Очевиден следующий механизм образования дефекта: след качания кристаллизатора – это всегда слабое место и концентратор напряжений. Глубина следов

качания зависит от параметров качания: амплитуды и частоты, так как их соотношение определяет время опережения, от которого зависит глубина следов.

Основная причина – это растягивающие напряжения и деформации на поверхности сляба. Они возникают в двух местах технологической линии УНРС: при изгибе сляба из вертикального положения до базового радиуса 5 м и разгибе сляба с базового радиуса 5 м до горизонтального положения. В первом случае растягивающим деформациям подвержена сторона большого радиуса, во втором случае – сторона малого радиуса. Деформации в обоих случаях практически одинаковые, так как зависят от толщины сляба и величины базового радиуса. Однако трещин по большому радиусу нет. Разница только в одном – в температуре поверхности сляба. При изгибе она около 1200 °С, а при разгибе 850-950 °С.

Известно, что все стали имеют температурный провал пластичности, диапазон которого и по температуре, и по величине потери пластичности разный [171]. Сталь марки 20 содержит 0,0250-0,0350 мас. % алюминия и 0,0070-0,0120 мас. % азота. При таких концентрациях алюминия и азота выделение нитридов алюминия (AlN) происходит в интервале температур 950-1000 °С в зависимости от произведения $[Al]X[N]$. Выделение нитридов алюминия вызывает охрупчивание стали и появление температурного провала пластичности. Исследования пластичности стали 20, проведенные в ИТЦ АО «ВМЗ» на аппарате Gleeble показали, что провал пластичности происходит в интервале температур 800-970 °С. Повышение произведения $[Al]X[N]$ сдвигает провал пластичности в сторону более высоких температур и расширяет его. Поэтому необходимо иметь содержание алюминия и азота на нижнем марочном пределе.

Металлургический анализ образования дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания» проводился с использованием всех возможных источников сбора и обработки технологических параметров производства в ЛПК. Также был проведен и литературный обзор образования дефектов на тонкослябовых УНРС [92, 94, 202, 235]. Дефекты можно разделить на две группы. Первая группа дефектов, которые образуются на слябе в процессе отливки на УНРС и они могут

быть полностью ликвидированы на стадии горячей прокатки. Вторая группа дефектов обусловлена ненадлежащими условиями прокатки [202].

Установленные основные технологические параметры с возможным влиянием на образование дефекта на стали 20 представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Перечень технологических параметров, влияющих на дефект «раскатанная поперечная трещина по следу качания»

Технологический параметр	Влияние на развитие дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания»
1. Колебания уровня металла в кристаллизаторе (в процентах или в мм) и среднеквадратичное отклонение)	Снижение колебаний уровня металла в кристаллизаторе снижает дефект
2. Скорость и изменение скорости литья (м/мин)	Стабильная скорость разливки без изменения снижает дефект
3. Поток металла на УНРС (т/ч)	По литературным данным [202] стабильный и максимально допустимый поток металла снижает дефект
4. Положение позиции стопора (мм)	Снижение случаев затягивания и смывов включений снижает дефект
5. Перегрев металла над температурой ликвидуса (°С)	По литературным данным [202] эффект снижения количества дефектов при перегреве менее 15 °С
6. Ширина разливаемого сечения (мм)	Снижение ширины разливаемого сляба снижает дефекты
7. Глубина погружения разливочного стакана в кристаллизаторе (мм)	По литературным данным [202] количество дефектов минимально при средних значениях погружения стакана (крайние значения верхней и нижней позиций ПРС не желательны)
8. Температура поверхности сляба перед и после туннельной печи (°С)	Повышение температуры снижает дефект
9. Химический состав стали [S], [Ti], [Al]	Количество случаев появления дефекта снижается при соблюдении следующих условий: [S] ≤ 0,0030 мас. % [Ti] ≤ 0,0015 мас. % [Al] ≤ 0,0250 мас. % Микролегирование ниобием увеличивает развитие дефекта
10. Чистота стали по оксидным неметаллическим включениям [O] _{общ}	По литературным данным производство «чистой стали» дефект снижает
11. Используемый материал кристаллизатора	Применение плит кристаллизатора с никелевым покрытием снижает развитие дефекта
12. Параметры качания кристаллизатора (амплитуда и частота, закон качания)	Достаточно низкое время опережения снижает дефект (менее 0,08 с)
13. Толщина проката (мм)	Прокат толщины менее 5 мм снижает дефект

В результате проделанной работы были внедрены следующие корректирующие мероприятия в ЛПК с целью снижения образования дефекта «раскатанная поперечная трещина по следу качания» на стали 20:

- снижена интенсивность охлаждения сляба в зоне вторичного охлаждения на 25 %;
- исключено применение глинозёмсодержащих материалов с повышенным содержанием оксида титана (TiO_2);
- снижена концентрация в металле общего алюминия с 0,028 до 0,022 мас. %;
- повышена температура нагрева сляба в туннельной печи в среднем на 10 °С.

3.6 Поиск и подтверждение значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов из-за неметаллических включений с применением метода углубленной аналитики и машинного обучения

Постановка задачи

Технологическая цепочка производства трубы включает как трубные цеха, так и производство рулона в ЛПК (рисунок 3.27). Периодически в трубных цехах возникают массовые отбраковки по дефектам металлургического (плена, пузырь-вздутие и индикации неметаллических включений внутри труб) и прокатного происхождения. В таких случаях необходимо в максимально короткие сроки найти и устранить причину для недопущения дальнейшего производства брака. Обычно такая задача решается отдельным сбором информации по браку в трубных цехах, отдельным сбором информации по параметрам в сталеплавильном и прокатном переделах, связыванием в excel-файлах всей информации и проведением анализа

«глазами» на месте. Либо сбор данных несколькими обученными инженерами-технологами посредством SQL-запросов ² из различных баз данных и проведение автоматизированного анализа. При этом применяется лишь малая часть математических алгоритмов для анализа.

Было предложено произвести поиск значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов с применением метода углубленной/продвинутой аналитики (Advanced Analytics) и машинного обучения (Machine learning), с использованием большого массива исходных данных и переход с рутинного ручного анализа технологических данных в непринужденную обработку в течение нескольких минут.

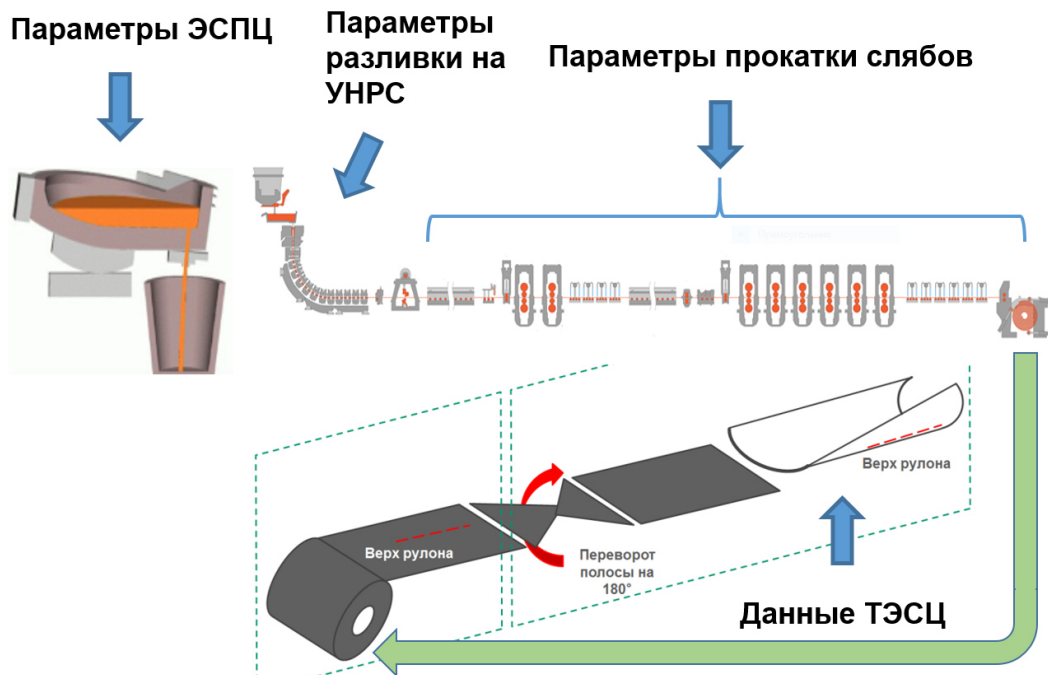


Рисунок 3.27 – Анализируемые параметры и данные из сталеплавильного, прокатного и трубного производства

Объём исследования составил 48 916 рулонов (слябов) и из них с дефектами плена и/или пузырь-вздутие было 1150 шт. За дефектный рулон принимался такой рулон, если более 15 % труб, изготовленных из него, имеют дефекты «плена»

² SQL-запрос – язык программирования структурированных запросов (SQL, Structured Query Language), который используется в качестве эффективного способа сохранения данных, поиска их частей, обновления, извлечения из базы и удаления.

или «пузырь-вздутие». В анализе удалось одновременно охватить данные от выплавки стали до регистрации дефектов в трубном цехе (ТЭСЦ). Предварительно данные готовились по следующей цепочке: «сбор-хранение-нормализация-анализ-применение». Также применялся структурированный подход внедрения элементов углубленной аналитики, который представлен в главе 2 в таблице 2.2.

Данные электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) включают в себя следующее (~120 параметров): параметры плавки в печи, на установке «ковш-печь» и вакууматоре, химический состав шлак и стали, отдаваемые материалы в производство, шихтовка плавов, содержание растворенного кислорода, содержание водорода в жидкой стали, температура стали и др.

Данные разливки на УНРС (~250 параметров): размер сляба, данные по сериям, средние значения технологических параметров и среднеквадратичные отклонения параметров УНРС и др.

Данные прокатки слябов (~380 параметров): информация о рулонах (листах и штрипса), параметры охлаждения проката, данные по энергосиловым параметрам прокатки, по валкам, по туннельной печи нагрева слябов и др.

Данные трубоэлектросварочного цеха (ТЭСЦ) прежде всего включали в себя информацию о поступивших рулонах, произведенных труб, зарегистрированных дефектов в трубе, обнаруженных визуальным методом.

С целью выявления наиболее релевантных технологических параметров был применён метод углубленной аналитики и машинного обучения с применением дерева принятия решений, модели «случайный лес», регрессии и опорные вектора, а «градиентный бустинг» выбрал из них лучшие модели. Результаты применения трёх алгоритмов машинного обучения к ~ 800 технологическим параметрам литейно-прокатного комплекса представлены на рисунке 3.28.



Рисунок 3.28 – Результаты применения алгоритмов машинного обучения к ~800 технологическим параметрам сталеплавильного производства, разливки стали на УНРС и горячего проката рулонов

В результате исследования были применены «продвинутые» методы анализа и сформулированы следующие выводы.

1. Установлены и подтверждены влияющие технологические параметры на дефекты: не стабильность разливки металла на УНРС (позиция стопора и уровень металла в кристаллизаторе), химический состав стали, состояние оборудования УНРС и прокатного стана, следствия от нестабильности на УНРС – это технология внепечной обработки стали, неметаллические включения в стали, применяемые материалы в технологии и др. Это говорит о том, что совершенствование технологии производства «чистой стали» с низким содержанием включений является правильным и важным направлением для снижения дефектов и повышения качества металлопродукции.

2. Необходимо снижать количество «анализа глазами», а также переходить на автоматический контроль качества собираемых данных.

3. Для подготовки и обработки данных нужна дополнительная работа. С другой стороны, к анализу и интерпретации результатов необходимо привлекать

как можно большее количество пользователей и специалистов (экспертов). Но для этого необходимо специальное программное обеспечение, с возможностью удобной визуализации и гибкой отчётности.

4. Анализ данных проводился лишь в направлении «технологические параметры → дефект», но в будущем рекомендуется проводить исследование «технологические параметры ↔ технологические параметры» и «дефект».

Исходя из анализа взаимосвязей были сделаны выводы по механизму образования дефектов в трубе. Ниже по степени важности в порядке уменьшения определены следующие направления работ по качеству металла для сталеплавильного производства.

Направление № 1 – это снижение в металле неметаллических включений (позиция стопора-моноблока, содержание в стали кальция и $Al_{окс}$, Ti и В). Направление мероприятий технологии производства «чистой стали» необходимо развивать и совершенствовать. Это работа по непрерывному совершенствованию технологии в сталеплавильном переделе. Важные взаимосвязи, например, колебания уровня металла в кристаллизаторе и позиция стопора-моноблока были поставлены на оперативный контроль в действующем производстве.

Направление № 2 – это состояние оборудования или ограничение по работе оборудования с учётом технологии (охлаждения в кристаллизаторе, охлаждения в ЗВО, роликовая проводка и сегменты УНРС). Сюда можно отнести формирование поперечных трещин из-за чрезмерного охлаждения сляба в ЗВО с целью получения плотной макроструктуры.

Направление № 3 – это подтверждение того, что вредные примеси в металле негативно влияют на качество металлопроката. Известно, что ослабление межкристаллитной прочности примесями цветных металлов, которые располагаются по границам зёрен, приводят к ухудшению горячей пластичности (Cu, Cr, Sn, Ni, Mo, В, Pb). В представленном анализе мы выявили для текущей ситуации в ЛПК критичные химические элементы Cu, Cr, Ni, Mo, В. В качестве шихты в ДСП следует применять чистые материалы, такие как чугун (PI), ГБЖ (НВИ), ПВЖ (DRI) и др.

Направление № 4 – это колебания уровня металла в кристаллизаторе. Колебания уровня металла в кристаллизаторе часто обусловлены затягиванием проходных сечений на участке между стопором и стакан-дозатором ковша. Необходимо внедрять мероприятия, которые снижают колебания уровня металла в кристаллизаторе: улучшения жидкотекучести металла и исключения в металле тугоплавких включений, совершенный дизайн разливочного стакана УНРС [173, 189, 190], более точный контроль уровня металла в кристаллизаторе, улучшенная роликовая проводка УНРС и др.

Весомость этих направлений работ представлено следующим образом:

- направление № 1 «оксидные включения в стали» – 0,034 (40,5 %);
- направление № 2 «режим работы оборудования» – 0,034 (40,5 %);
- направление № 3 «химический состав стали» – 0,010 (11,9 %);
- направление № 4 «уровень металла в кристаллизаторе» – 0,006 (7,1 %).

С целью снижения дефектов в трубном переделе необходимо в сталеплавильном производстве интенсивно реализовывать мероприятия, снижающие влияние факторов на образование дефектов по направлениям № 1 и 2, а также параллельно совершенствовать технологию производства стали и по остальным направлениям.

Таким образом, полученные данные, которые представляются после корректной обработки «больших данных» дают полезную информацию по весомости влияния тех или иных параметров, как по отдельности, так и в сумме (комплексное влияние). Руками (или анализ глазами) одному человеку без такого инструмента обработки данных сделать это практически невозможно или это будет очень трудоёмко и занимать продолжительное время. Скорее всего, проводить такие продвинутые (углубленные) анализы будет полезно после реализации глобальных мероприятий в производственном цехе по качеству или модернизации производства. Анализ «больших данных» должны делать специально обученные люди, а экспертизу специалисты, которые разбираются в деталях и видят картину по технологии и природе образования дефектов.

Обработка больших данных – это дополнительный инструмент для технологов, но неосновной. Также необходимо понимать, что данные имеют ценность

только в том случае, когда ими начинаешь пользоваться, а не просто собирать и архивировать. Технология «больших данных» не даст сейчас и завтра сверх эффектов, но если эту тему поддерживать и развивать, то в будущем может дать хорошие результаты по стабильности технологии и производству высококачественной стали. Следует смотреть на реальные данные, которые удалось наблюдать, и пытаться спрогнозировать, как могла выглядеть ситуация, недоступная обычным наблюдением и мониторингом. Большие данные – это также дисциплина и возможность начать собирать те данные, которые раньше не собирались или на которые производители стали не обращали внимание. Из недостатков можно отметить следующее. «Большие данные» не решают текущих проблем с качеством, но смогут быть дополнительным инструментом для правильно поставленных задач по качеству и совершенствованию технологии.

Расследование причин колебаний уровня металла в кристаллизаторе и прорывов

Основными причинами колебания уровня металла в кристаллизаторе УНРС являются отклонения от технологических параметров. Для оценки колебаний уровня металла в кристаллизаторе был установлен новый параметр, определяющий стабильность разливки – это среднеквадратичное отклонение колебания уровня металла. Среднее квадратичное отклонение колебаний уровня металла в кристаллизаторе определялось путём извлечения квадратного корня из дисперсии по фактическим данным. Данное значение в ЛПК определяется автоматически отдельно для сляба или плавки в целом. Одной из проблем непрерывной разливки тонких слябов является образование прорывов жидкого металла через кристаллизующую корочку металла, а также процесс колебаний уровня металла в кристаллизаторе со среднеквадратичным отклонением более 0,55 (таблица 3.13). При среднеквадратичном отклонении менее 0,55 количество отработки циклов «ужимины» и «прилипание» было минимальным на стали 20. Противоположная ситуация для низкокремнистой стали Ст2ПС ($[Si] < 0,15$ мас. %). Определение истинной причины прорыва и колебаний уровня металла позволяет в дальнейшем уменьшить и даже исключить удельное количество прорывов и случаев значительных колебаний уровня металла в кристаллизаторе.

Таблица 3.13 – Влияние среднеквадратичного колебания уровня металла в кристаллизаторе тонкослябовой УНРС на образование «ужимин», «прилипаний» слитка и порывов

Показатели для 3-х месячного периода производства	Марки стали		
	Сталь 20 [C] = 0,17-0,19 мас. %	Ст2ПС [C] = 0,15-0,21 мас. %	Ст2ПС [C] = 0,05-0,06 мас. %
Среднеквадратичное отклонение колебания уровня металла в кристаллизаторе	0,51-0,56	0,70-0,75	0,80-1,30
Индекс отработанных циклов «ужимина», шт. на 100 тыс. тонн металлопроката	4,5	362,5	316,5
Индекс отработанных циклов «прилипание», шт. на 100 тыс. тонн металлопроката	3,7	78,8	118,7
Индекс порывов, шт. на 100 тыс. тонн металлопроката	0	0	4,9

За рубежом для установления причины образования порывы группируют на два типа [165]: 1 – порывы, происходящие на пуске ручья и 2 – порывы во время разливки, к этой группе относят подвисяние («прилипание») слитка в кристаллизаторе.

Имеется большое количество публикаций по порывам подвисяния / «прилипанию» на слябовых и тонкослябовых УНРС. Схема образования порыва подвисяния представлена на рисунке 3.29.

С другой стороны, существует ограниченное число статей, касающихся методологий и инструментов, необходимых для предотвращения других типов порывов. Например, канадское предприятие EVRAZ Regina [165] активно работает в направлении предотвращения всех видов порывов путём разработки мероприятий и стратегий для слябовых УНРС. Сюда входит контроль тепловой карты кристаллизатора (передача тепла) и обнаружение «прилипаний» или «ужимин», определение смещенного потока стали в кристаллизаторе и влияние водорода на порыв.

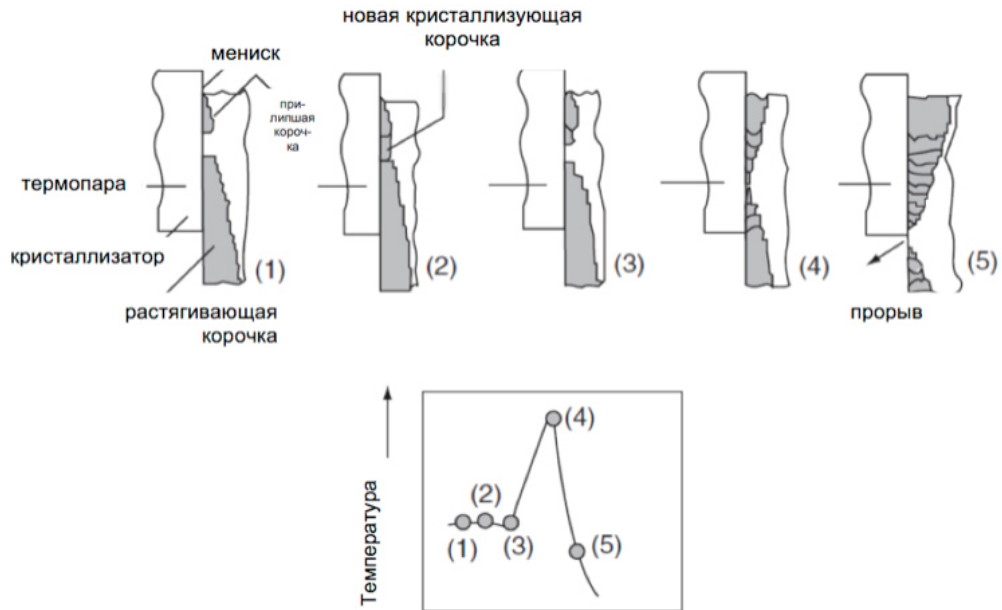


Рисунок 3.29 – Схема образования прорыва подвисяния слитка в кристаллизаторе и график изменения температуры на медной плите кристаллизатора по фазам:

1 – Разрыв корочки металла в кристаллизаторе в результате «прилипания» металла в кристаллизаторе; 2 – Образование в зоне разрыва новой аномальной корочки металла в кристаллизаторе; 3 – Растягивающие напряжения приводят к образованию тонкой корочки металла; 4 – Вытягивание слитка из кристаллизатора продолжает растягивать корочку слитка; 5 – Разнотолщинность поверхностной корочки приводит к образованию прорыва под кристаллизатором на дефектном участке под воздействием ферростатического давления жидкого металла внутри сляба

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 плит, не оптимальный физико-химический состав шлака в кристаллизаторе и др.). Прочие прорывы из-за малой вероятности возникновения не рассматривались.

Растворенный водород и азот в стали приводят к значительному ухудшению качества конечной продукции, начиная от поверхностных раковин, микро трещин в слябе и заканчивая образованием прорыва. Согласно Туркдогану [57], растворимость водорода в чистом железе уменьшается от 0,0038 мас. % до 0,0007 мас. %

в точке кристаллизации. Таким образом, существует содержание водорода, при котором он будет медленно диффундировать по направлению к поверхности, будет накапливаться вокруг пустот и включений и приведёт к образованию трещин, поскольку давление может достигать до 10000 атм. Такое же явление возможно с азотом, так как растворимость уменьшается от 0,0480 до 0,0140 мас. %. Тем не менее, содержание азота в жидкой стали редко превышает предел растворимости в твёрдой стали. В реальных условиях значительное количество растворенного водорода находится в затвердевшей стали.

Существует множество доказательств в литературе [172, 209], что более высокий уровень водорода в жидкой стали снижает среднюю скорость передачи тепла в кристаллизаторе (на основе изменений температуры охлаждающей воды), предполагая, что все остальные условия неизменны. Различия по концентрации водорода выявляются во время разливки металла на УНРС по тепловой карте кристаллизатора (рисунок 3.30).

Основной переменной является физико-химическая природа расплавленного шлака (образованного путём плавления ШОС) и как он изменяется от содержания водорода. Присутствие паров воды изменяет температуру кристаллизации разливочного порошка в сторону высоких температур за более короткое время по сравнению с инертной атмосферой аргона (без паров воды) [95]. Эта реакция усиливается наличием твёрдых оксидных неметаллических включений, которые действуют как центры зародышеобразования. Кроме того, как это было подтверждено в данном исследовании, наличие крошечных пузырьков газа в шлаковой пленке кристаллизатора снижает работоспособность ШОС. Например, пузырьки газа снижают теплопередачу, что приводит к формированию более тонкой корочки слитка. Следовательно, более тонкая корочка слитка и большие трения в кристаллизаторе могут привести к прорыву из-за «прилипания».

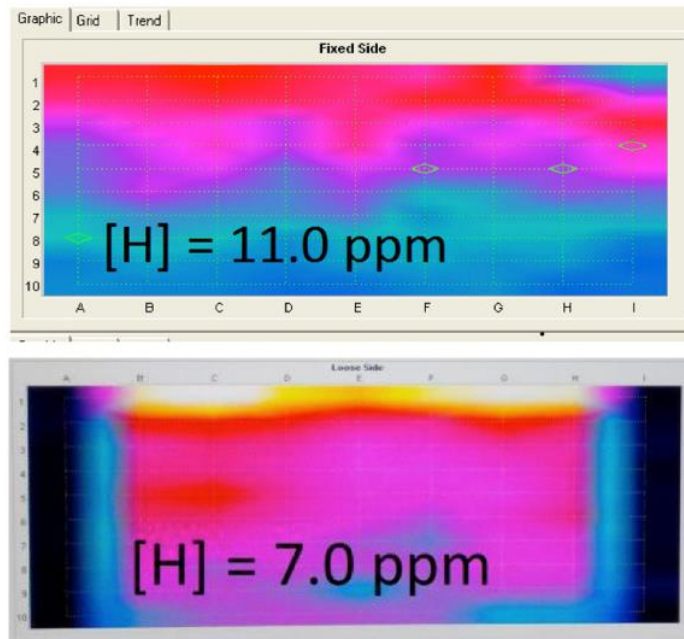


Рисунок 3.30 – Виды тепловой карты кристаллизатора при различных концентрациях водорода в жидком металле (синий цвет – снижение теплопередачи от слитка к кристаллизатору)

Опыт работы ЛПК показывает, что основные источники водорода могут быть следующими.

1. Добавление гидратированной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на выпуске плавки и во время внепечной обработки стали, а также использование различных флюсов (флюорит, глинозём, боксит и др.).

2. Добавление углеродосодержащих материалов (кокс и графит) в сталеразливочный ковш.

3. Добавление теплоизолирующих материалов в сталеразливочный ковш перед передачей ковша на УНРС.

4. Футеровка промежуточного ковша и шлаковые смеси, добавляемые в промежуточный ковш.

5. Атмосферная влага (особенное влияние отмечается в летний период года).

Механизм образования прорыва кристаллизующейся корочки металла по продольной трещине связан с нарушением работы шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе по причине повышенного содержания оксидов в ме-

талле, которые повышают вязкость шлака в кристаллизаторе. Кроме этого, провоцирует образование прорыва наличие в металле водорода, который при концентрациях более 0,0009 мас. % начинает выделяться из стали в виде газа при кристаллизации, что также изменяет свойства ШОС в кристаллизаторе (снижается теплопередача через ШОС). Влияние оксидов и водорода в металле необходимо учитывать в расследовании причин прорывов на тонкослябовой УНРС в условиях ЛПК.

С целью снижения водорода в жидком металле были сформулированы следующие технологические решения:

- максимальная защита металла от наводороживания;
- использование ферросплавов, огнеупоров и шлакообразующих материалов с наименьшим содержанием влаги (входной контроль на содержание влаги в материалах перед их использованием или прокаливанием их перед задачей в бункера);
- производится вакуумирование металла в периоды повышенной влажности и при увеличении давления паров воды в атмосфере воздуха в летний период года;
- осуществление вакуумирования марок стали чувствительных к образованию прорыва из-за водорода.

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 (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 во время разливки.

К данным мероприятиям относится следующее.

1. Использование соответствующей ШОС для кристаллизатора и определенных групп марок сталей.

2. Регулярное техническое обслуживание оборудования УНРС (плиты кристаллизатора и роликовая проводка).

3. Компьютерный мониторинг и контроль тепловой карты кристаллизатора, а также регулирование изменения скорости вытягивания слитка из кристаллизатора в автоматическом режиме.

4. Содержание водорода в промежуточном ковше должно быть ограничено верхним пределом в зависимости от концентрации азота в металле [172]:

- для $[N] = 0,010-0,012$ мас. % ограничение содержания водорода $[H]$ не более 0,00080 мас. %;

- для $[N] = 0,007-0,009$ мас. % – $[H] < 0,00085$ мас. %

- для $[N] = 0,005-0,006$ мас. % – $[H] < 0,00090$ мас. %

5. Обеспечение контроля содержания влаги в материалах, используемых в технологии производства тонких слябов.

6. Реализация мероприятий по исключению колебаний уровня металла в кристаллизаторе (корректировка химического состава стали в рамках пределов требований документации, модифицирование тугоплавких включений в жидкие, снижение процессов вторичного окисления металла на участке сталеразливочный-промежуточный ковш и др.).

7. Реализация мероприятий, направленных на снижение в металле оксидных неметаллических включений (снижение общего содержания в металле кислорода до уровня не более 0,0020 мас. %).

Факторный анализ причин образования прорыва на УНРС

На рисунке 3.31 представлена динамика удельного числа прорывов на тонкослябовой УНРС с 2013 по 2018 г, которая подтверждает результативность работ, проводимых в ЛПК. Использование автоматического сбора данных для проведения факторного анализа в ЛПК позволяет 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 производится корректировка технологии и работы оборудования, что позволяет уменьшить количество

прорывов до значений $\sim 0,46$ шт. на 100 тыс. тонн ГРК и тем самым снижаются аварийные простои оборудования комплекса и увеличивается производительность.

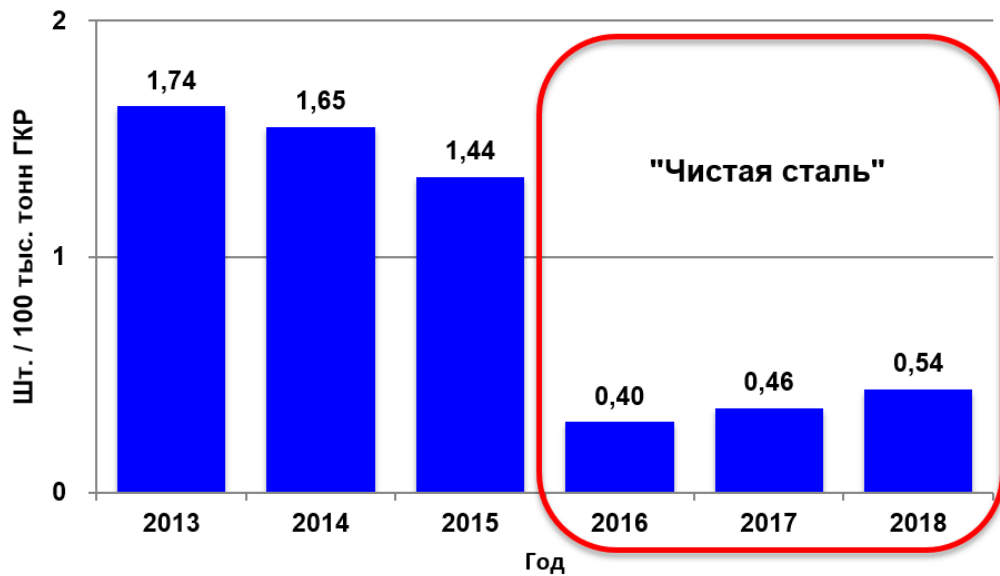


Рисунок 3.31 – Удельное число прорывов на тонкослябовой УНРС ЛПК «до» и «после» осуществления углубленного анализа разделения причин и реализации мероприятий производства «чистой стали» (ГРК – горячекатаные рулоны)

С целью установления причины прорыва кристаллизующейся корочки металла на УНРС проводится факторный анализ влияющих технологических параметров от выплавки стали до разливки на УНРС. Анализ проводится путём суммирования всех факторов, повлиявших на прорыв, для установления значимых параметров. Для этого используется автоматический сбор информации со всех участков производства, при этом те параметры, которые фиксировались на бумажных носителях или в локальных таблицах excel на персональных компьютерах, теперь собираются в единую систему или используются дополнительные (расширенные) модули сбора и передачи информации в единое место хранения.

На основе выполненных работ, описанных в этой главе, были разработаны следующие документы:

- 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);

- регламент 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).

На основании первого регламента устанавливались объективные причины прорывов на УНРС или колебаний уровня металла в кристаллизаторе, что позволило уменьшить число прорывов в 3,5 раза (рисунок 3.31), также структурировать типы прорывов и их причины представлены на рисунке 3.32, что в целом положительно сказалось на производительности цеха и качества выпускаемого металлопроката. В результате применения в работе регламента испытаний новых материалов на УНРС выполнена систематизация процесса испытаний материалов, сбор данных для углубленных анализов и разработки эффективных рекомендаций для дальнейшего применения. В Приложении Г представлено письмо по проекту «чистая сталь» с получением положительных результатов на практике.

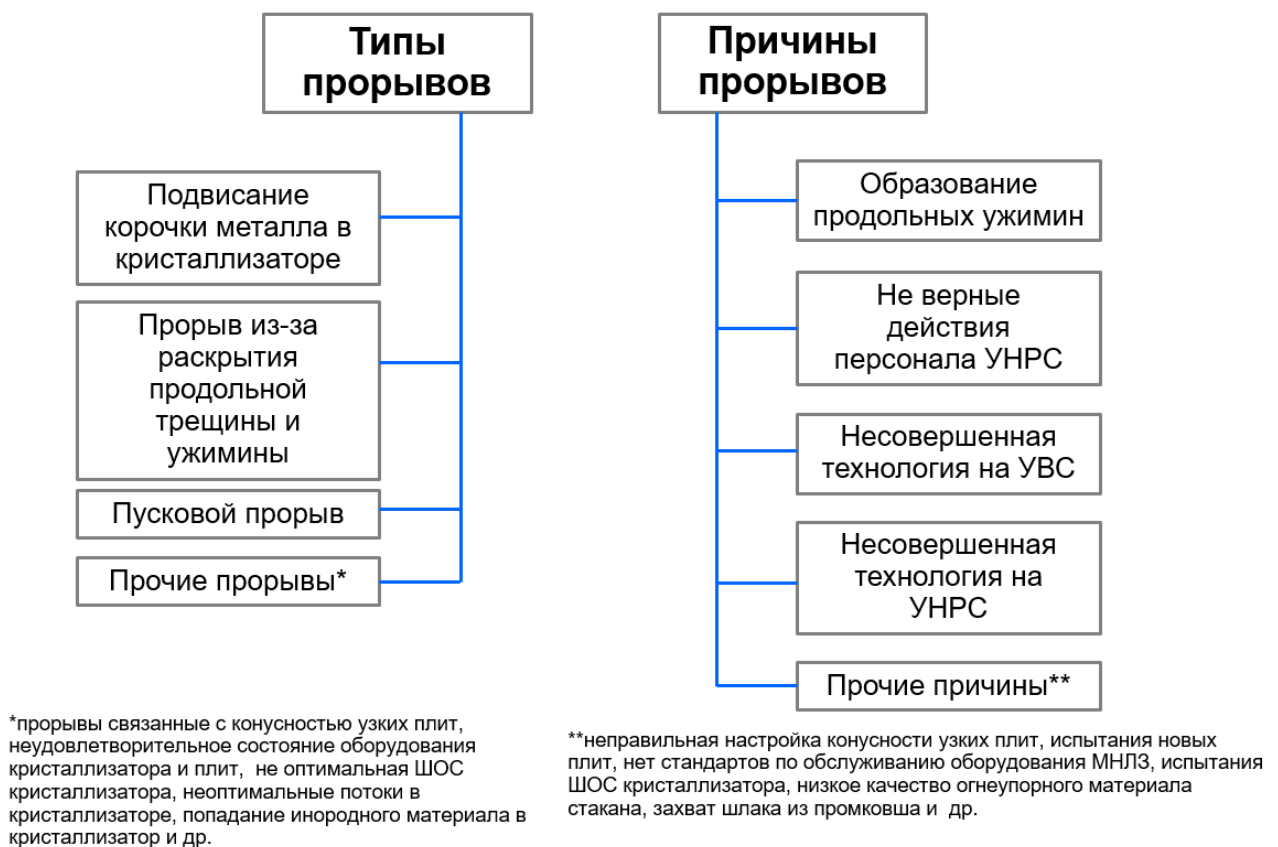


Рисунок 3.32 – Основные типы и причины прорывов на тонкослябовой УНРС (УВС – участок выплавки стали, в который входит дуговая сталеплавильная печь, установка «ковш-печь» и камерный вакууматор)

Выводы по главе 3

1. Согласно проведённым термодинамическим расчётам в программе STM было установлено, что снижение количества сталеплавильного шлака, попадающего не более 6 кг/т, может стабилизировать получение необходимого ковшевого шлака по химическому составу, который эффективно можно скорректировать на внепечной обработке стали.

2. Осуществлена доработка программы STM по добавлению специального раздела «Выпуск», с целью осуществления эффективных комплексных расчётов раскисления, легирования и шлакообразования на выпуске плавки из сталеплавильного агрегата, с учётом технологических ограничений по химическому составу стали и шлака, по массе шлака и использованию материалов. Применение раздела «Выпуск» в программе STM на практике сократило время на расчёты для разработки технологии «чистая сталь» с 3-х дней до нескольких часов.

3. Практическая польза от применения комплексного подхода разработки технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС заключается в следующем: установлены совершенные режимы аргоновой продувки стали в сталеразливочном ковше; установлено критическое поступление кислорода в расплав для производства «чистой стали» (не более 0,2 кг/т); уточнена технология модифицирующей обработки «чистой стали» кальцием с выдачей рекомендаций для практической реализации на металлургических предприятиях. В частности, были установлены 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.

4. Выполненный анализ комплекса мероприятий производства высококачественной стали от выплавки до разливки позволил применить комплексный подход

разработки технологии «чистой стали» с применением всех доступных 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, огнеупоры, применяемые материалы на выплавке и разливке стали.

5. С целью получения содержания общего кислорода менее 0,0018 мас. % в промежуточном ковше и исключения поступления кислорода из воздуха необходимо обеспечить снижение концентрации SiO_2 в шлаке до уровня ниже 40 мас. % (целевое значение – 25-35 мас. %). Термодинамическими расчётами было подтверждено, что при концентрациях SiO_2 в шлаке более 60 мас. % интенсифицируется процесс окисления металла, который может приводить к изменению физико-химических свойств шлаковой смеси в кристаллизаторе с образованием грубых поверхностных дефектов на литом металле, вплоть до образования прорыва из-за «прилипания» кристаллизирующейся корочки металла к кристаллизатору УНРС.

6. Термодинамические расчёты показывают, что процессы вторичного окисления через шлак (степень влияния от 5 до 50 %) и поступление кислорода из воздуха (от 30 до 80 %) имеют первостепенное значение, на которое необходимо обратить внимание для дальнейшего совершенствования технологии производства особо чистых марок стали, с ультранизким содержанием в металле оксидных неметаллических включений. Обобщая рассмотренные результаты практических и теоретических исследований, можно сказать, что предотвращение загрязнения стали неметаллическими включениями из-за вторичного окисления возможно только при комплексном подходе к решению поставленной задачи.

7. Определена степень влияния на чистоту стали физико-химических свойств огнеупорных материалов, применяемых в промежуточном ковше, которая составляет менее 10 % (в среднем около 5 %) от общей степени влияния других процессов поступления кислорода в расплав из атмосферы воздуха и шлака.

8. Было рекомендовано во время разливки металла на УНРС осуществлять контроль за поверхностными дефектами и за «прилипанием» корочки слитка к кристаллизатору, так как причины данных отклонений связаны с процессами вторичного окисления. Кроме этого, следует в режиме реального времени контролировать индикаторы процесса вторичного окисления по таким показателям как прирост азота в металле, изменение концентрации химических элементов в стали (Al, Si, Mn) и связанного алюминия ($Al_{\text{окс}}$).

9. К основным предлагаемым мероприятиям для разливки «чистой стали» на УНРС относят следующее: подача аргона и организация процесса разливки металла на УНРС, исключающие поступления кислорода из воздуха и шлака и в том числе применение промежуточного ковша, который исключает оголение расплава и замешивание шлака с металлом или минимизирует неблагоприятные турбулентные потоки металла внутри ковша; мероприятия по обслуживанию, обороту сталеразливочных ковшей и качеству стартовой смеси, исключающие прожигание шибера кислородом; применяемые шлакообразующие материалы в промежуточном ковше должны не окислять металл во время разливки и не приводить к процессу ресульфурации металла (ограничение в материалах по SiO_2 и сере), должна применяться технология автоматической отсечки ковшевого шлака в комплексе с профилированным дном сталеразливочного ковша; следует применять цельные разливочные стаканы типа SEN.

10. С целью снижения в металле эндогенных и экзогенных включений, в состав которых входит магнезиевая шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$), для трубного сортамента общепринятых мероприятий недостаточно. Поэтому необходимо дополнительно реализовывать мероприятия по снижению отрицательного влияния огнеупоров и шлака в ковше на качество стали. К таким мероприятиям относится стабилизация химического состава шлака, 100 % контроль химического состава шлака и используемых материалов, дополнительное оцифровывание технологических параметров сталеразливочного ковша, ужесточение требований к технологии применения огнеупоров сталеразливочного ковша, его подготовка, снижение времени нахождения металла в сталеразливочном ковше.

11. 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. Кроме этого учтён дефект плена «прокатная» с целью однозначного разделения дефектов, не связанных со сталеплавильным производством и неметаллическими включениями. Таким образом, исключены разногласия по источнику возникновения дефекта из-за неметаллических включений и внесены соответствующие уточнения в классификатор дефектов, что позволит выйти на необходимые мероприятия для конкретного случая или металлургического предприятия.

12. Разработана классификация дефектов, возникающих при производстве высококачественной «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. Классификация позволяет минимизировать затраты на дорогостоящие промышленные эксперименты.

13. В результате исследования влияющих параметров на дефекты в трубе «плена» и «пузырь-вздутие» с применением прогнозной аналитики большого массива данных, были установлены и подтверждены значимые технологические параметры образования сталеплавильных дефектов: влияние нестабильности разливки металла на УНРС через параметр «позиция стопора» и «уровень металла в кристаллизаторе», химический состав стали и содержание в ней вредных примесей, работа оборудования УНРС и стана горячей прокатки. Для более глубоких аналогичных исследований данных следует проводить анализы не только в направлении «технологические параметры → дефект», но и взаимовлияющих направлениях: «технологические параметры ↔ технологические параметры» и «дефект».

14. Продвинутые (углубленные) анализы рекомендуется также проводить после реализации масштабных мероприятий в производственном цехе по качеству

или модернизации производства и оборудования. В таком случае анализ «больших данных» должны делать специалисты, работающие с большими массивами данных и совместно со специалистами и экспертами в области металлургии.

15. В результате проделанной работы и изучения прорывов в ЛПК были разработаны рекомендации по минимизации возникновения прорывов на УНРС по применяемым материалам, обслуживанию оборудования УНРС, мониторингу и контролю тепловой карты кристаллизатора, содержанию газов в металле (водород и азот) и реализации мероприятий, исключающих колебания уровня металла в кристаллизаторе путём корректировки химического состава стали и содержания в ней неблагоприятных неметаллических включений, и снижению процессов вторичного окисления металла во время разливки, а также снижению в металле общего кислорода до уровня не более 0,0020 мас. %.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В МЕТАЛЛЕ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ, ВКЛЮЧЕНИЙ И ГАЗОВ НА СВОЙСТВА ШОС В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

В главе 1 был сформулирован вывод, что на фоне текущих проблем производства «чистой стали» в сталеплавильном цехе, вопросы по выбору оптимального ШОС для кристаллизатора решаться в такой ситуации не могут. В данном случае путь совершенствования технологии производства высококачественной стали может быть продолжительным и экономически нецелесообразным. Можно предположить, что если эти задачи и проблемы до кристаллизатора были решены, включая промежуточный ковш, то следует переходить к решению следующих задач: разработка комплекса технологических мероприятий производства «чистой стали» с учётом влияния ШОС кристаллизатора, создание нового алгоритма, определяющего значимые технологические параметры, которые уменьшат содержание в металле неметаллических включений и повысят качество металлопродукции.

4.1 Технологические особенности свойства шлака в кристаллизаторе для разливки «чистой стали»

При рассмотрении в главе 3 (Приложение В) дефекта «плена» было упоминание, что содержание в дефекте Ca, Si, Na и K (а именно, силикаты кальция с флюсами CaF_2 и Na_2O) указывает на возможное влияние шлакообразующей смеси (ШОС) из кристаллизатора. Если поступление неметаллических включений в достаточно тонкий жидкий слой ШОС в кристаллизаторе будет существенным, то физико-химические свойства ШОС изменятся и приведут к возникновению поверхностных дефектов на непрерывнолите металле. Далее в процессе прокатки такого металла возможно формирование «плёны» или других раскатанных дефектов [186].

В настоящее время при непрерывной разливке стали применяют ШОС, которые расплавляются и образуют шлаковый расплав за счёт тепла от металла и частично за счёт горения углерода. Для обеспечения стабильной разливки и высокого качества поверхности заготовки ШОС должна формировать устойчивый гарнисаж, с оптимальной толщиной жидкой шлаковой прослойки по всей зоне контакта корочки металла и кристаллизатора, максимально выравнивать теплоотвод по периметру и высоте кристаллизатора, обеспечивать снижение его в применниковой зоне, а также надёжно защищать мениск от вторичного окисления и обеспечивать его теплоизоляцию, и в некоторых случаях ассимилировать неметаллические включения [154].

К свойствам ШОС для кристаллизатора относят следующее [120, 197]:

- вязкость (Па·с);
- интервал плавления, скорость и толщина жидкого шлака;
- просачивание шлака в зазор и его расход (кг/т);
- основность (CaO/SiO_2);
- кристаллизация и формирование шлаковой плёнки;
- теплоперенос.

На рисунке 4.1 представлена типичная структура фаз и слоёв шлака в кристаллизаторе УНРС в процессе разливки [120, 131]. Слой шлака, прилегающий к стенке кристаллизатора, охлаждается достаточно быстро и имеет повышенную вязкость, таким образом, действуя как повторно затвердевший твёрдый слой с аморфной (стекловидной) структурой. Его толщина значительно увеличивается чуть выше мениска, где его называют «коркой шлака» или «шлаковым гарнисажом». В зависимости от его состава и режима охлаждения, микроструктура этого слоя может быть аморфной, кристаллической (куспидин – $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{CaF}_2$) или их смесью одновременно. Шлак проникает в зазор слиток-кристаллизатор кратковременным и неоднородным образом. Твёрдый слой часто остается прилипшим к стенке кристаллизатора (толщина 1-2 мм), но иногда периодически перемещается вниз при колебательных движениях кристаллизатора. Толщина жидкого слоя шлака составляет около 0,1-0,3 мм. Также известно, что плёнка

шлака играет решающую роль в процессе литья, поскольку толщина жидкого слоя контролирует смазку, а толщина твёрдого слоя регулирует отвод тепла от корочки слитка [120, 197]. В процессе стабильного литья на УНРС шлак со стороны корочки стали имеет кристаллическое состояние (куспидин), а со стороны кристаллизатора – аморфное. До сих пор достаточно глубоко не изучен механизм течения, разрушения и налипания слоя шлака в кристаллизаторе. В этом направлении данные исследования в мировой практике продолжают свое развитие [71, 97, 123, 166, 197].

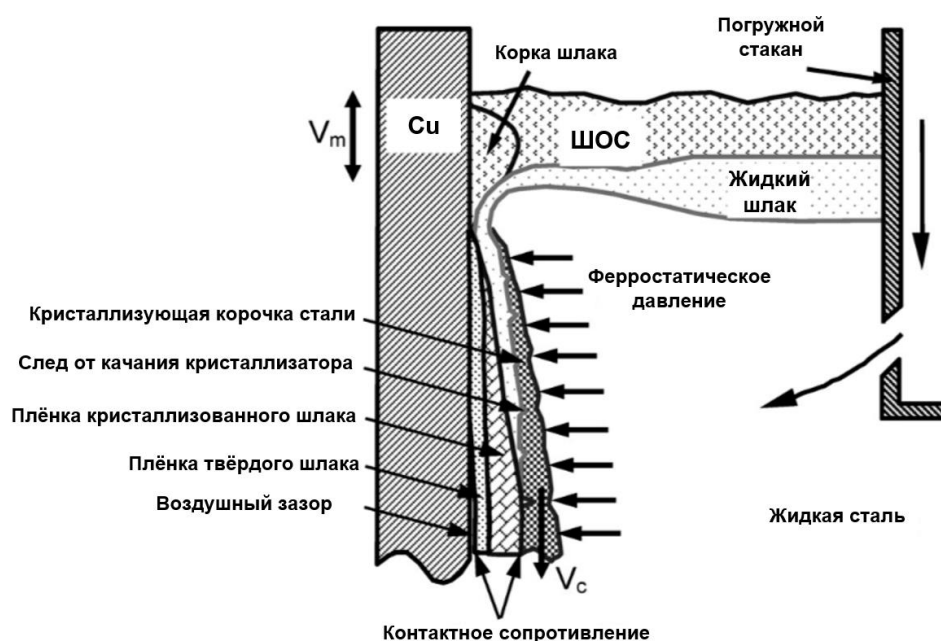


Рисунок 4.1 – Типичная структура слоя шлака в кристаллизаторе в процессе непрерывной разливки на УНРС (V_c – направление вытягивания слитка; V_m – колебательные движения кристаллизатора) [120]

Со стороны мениска в верхней части кристаллизатора ШОС состоит из трёх слоёв: порошок ШОС, спеченный и жидкий слой шлака. Влага из ШОС испаряется в верхней части слоя, а затем при температуре около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ карбонаты (CaCO_3 и Na_2CO_3) разлагаются с образованием оксида и CO_2 . Далее углерод в ШОС сгорает с образованием CO и CO_2 для области, где температура в слое составляет от 500 до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом температурном диапазоне частицы минералов начинают спекаться. Далее, твёрдый шлак начинает плавиться при температурах от 900 до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего формируется шлаковый расплав с оставшимися ча-

стицами углерода. Шлаковый жидкий расплав важен для процесса литья на УНРС. Для традиционной слябовой УНРС, с целью обеспечения удовлетворительного проникновения шлака в зазор слиток-кристаллизатор, глубина шлакового расплава должна составлять не менее 10 мм.

Из-за более плотной упаковки молекул примерно в 2 раза, теплопроводность кристаллических шлаков выше, чем у аморфных [123]. Однако, эффективная теплопроводность плёнки шлака снижается из-за наличия пор, границ зёрен, образования различных твёрдых фаз и т.д. На рисунке 4.2 показаны примеры передачи тепла для аморфного и кристаллического шлаков, а также внешний вид и структурное состояние этих шлаков, извлеченных из кристаллизатора УНРС.

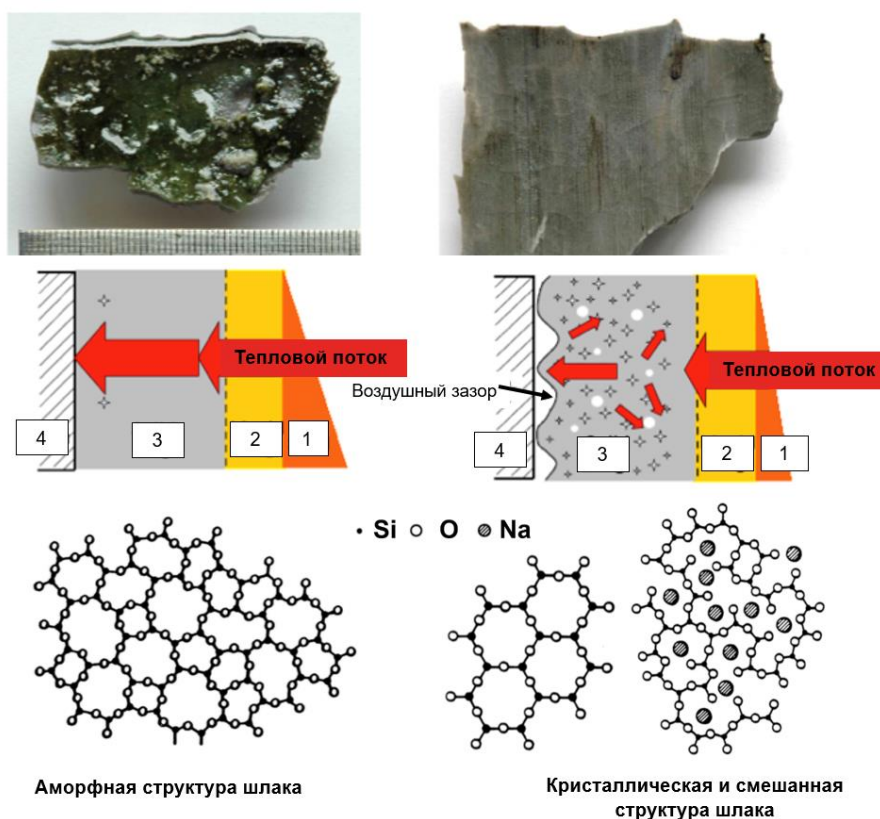


Рисунок 4.2 – Схема передачи тепла для аморфного (а) и кристаллического (б) шлаков и внешний вид твёрдых шлаков; 1 – затвердевшая оболочка слитка; 2 – жидкий слой шлака; 3 – твёрдый слой шлака; 4 – медный кристаллизатор УНРС

На рисунке 4.3 представлена схема шлакового гарнисажа (слоёв) и изменение температурного профиля в кристаллизаторе УНРС. Интервал скоростей охлаждения шлака может составлять 10-30 °C/c [131].

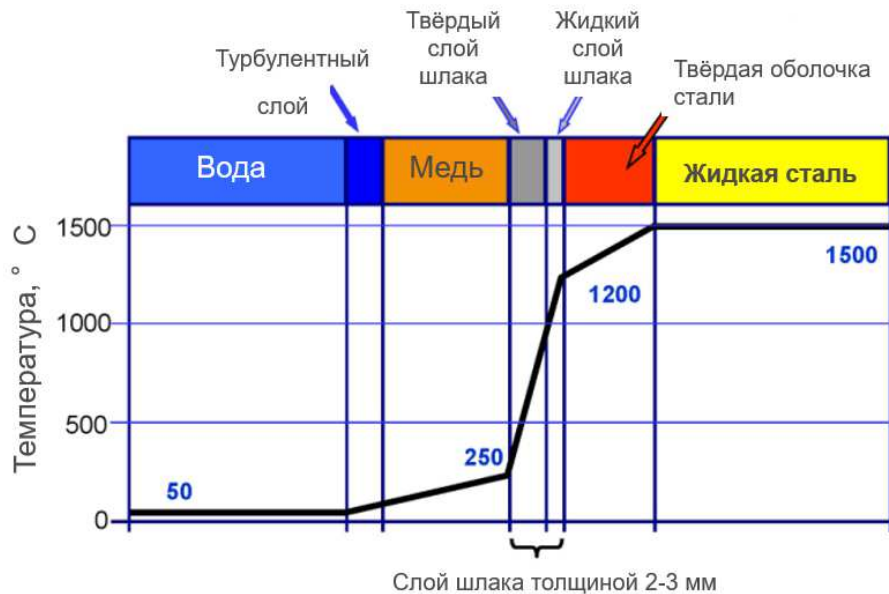


Рисунок 4.3 – Схема шлаковых слоёв и изменение температурного профиля в кристаллизаторе УНРС [120, 197]

Зависимость плотности теплового потока (q) от величины поперечного сечения слоя (d) шлакового гарнисажа для основности 0,875 и 1,500 представлена на рисунке 4.4. [131]. Пунктирными линиями нанесены критические величины интенсивности теплоотвода от слитка в кристаллизаторе УНРС для обеспечения бездефектной непрерывной разливки низкоуглеродистых (верхняя пунктирная линия) и среднеуглеродистых (нижняя пунктирная линия) сталей.

В настоящее время к ШОС для кристаллизатора УНРС в сертификатах качества устанавливают следующие физико-химические свойства, которые должны соответствовать разливаемой стали и формату заготовки или сляба на УНРС:

- основной химический состав ШОС по содержанию $C_{\text{общ}}$, $C_{\text{своб}}$, F, Al_2O_3 , R_2O , Li_2O , MnO , Fe_2O_3 , MgO должен гарантироваться с высокой точностью и обеспечивать указанную основность $CaO/SiO_2 \pm 0,05$;
- влажность ШОС не должна превышать 0,5 мас. %;
- температура деформации (размягчение), начала плавления и течения ШОС должна указываться с точностью $\pm (20-30) ^\circ C$;
- вязкость ШОС в интервале температур от 1200 до 1400 $^\circ C$ (Па·с);
- фракционный состав ШОС.

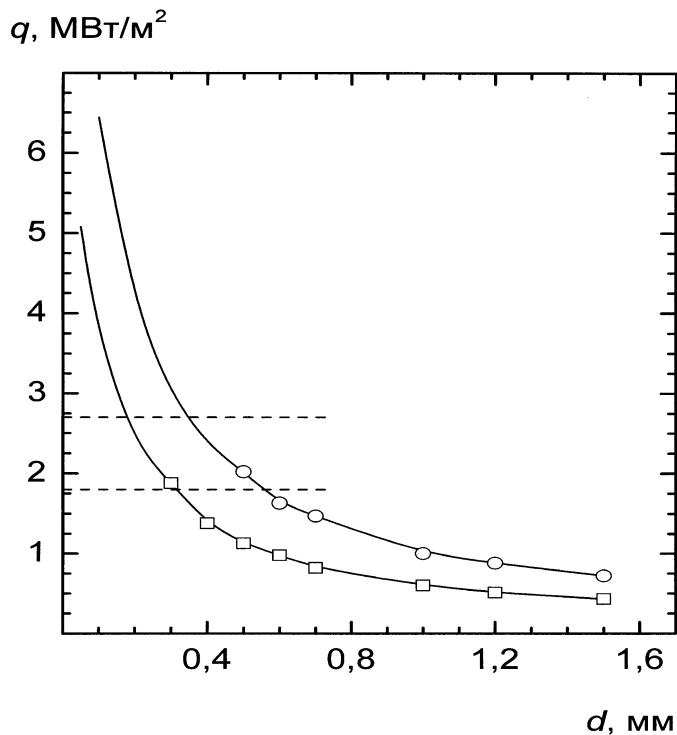


Рисунок 4.4 – Зависимость плотности теплового потока q от величины поперечного сечения слоя d шлакового гарнисажа $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$ с $x(\text{CaF}_2)=0,2$, $x(\text{Al}_2\text{O}_3)=0,075$; \circ – $x(\text{CaO})/x(\text{SiO}_2)=0,875$ и \square – $x(\text{CaO})/x(\text{SiO}_2)=1,5$

Действие ШОС на мениске металла характеризуется способностью жидкого шлака проникать в зазор между слитком и стенками кристаллизатора. Плохая смачиваемость металлом гарнисажа в применисковой зоне вызывает появление шлаковых включений, науглероживание поверхности, а также формирует грубые метки от качания кристаллизатора на поверхности слитка.

Проникновение шлака непосредственно в зазор между слитком и кристаллизатором и формирование в нём шлаковой прослойки является наиболее важной функцией ШОС, так как этот процесс фактически определяет возможность образования поверхностных и подповерхностных дефектов металла, а также влияет на вероятность прорывов на УНРС. На процесс проникновения шлака в зазор влияет следующее: вязкость и температура затвердевания шлака, поверхностное натяжение на границах «шлак – твёрдый металл» и «шлак – кристаллизатор», величина теплового потока от слитка к кристаллизатору, а также стабильность поступления жидкого шлака с поверхности расплавленного металла через участок мениска [123].

Тип ШОС в большей степени зависит от марки стали и режима её раскисления (низкоуглеродистые, высокоуглеродистые, перитектические, низкоуглеродистые низколегированные, нержавеющие и др.), разливаемого сечения и типа УНРС (сляб, тонкий сляб, сортовые, блюмовые, фасонные типа «собачья кость»), скорости вытягивания слитка из кристаллизатора, типа качания (от низко до высоко частотного). Примеры критериев выбора ШОС для кристаллизатора УНРС в зависимости от марки стали представлены в таблице 4.1 [166].

Таблица 4.1 – Критерии выбора ШОС кристаллизатора в зависимости от марки стали

Марка стали	Температура ликвидус	Скорость разливки	Образующая фаза при кристаллизации стали	Прочность корочки металла	Типовые проблемы на УНРС
ULC / IF-сталь (сверх низкий углерод ~ 30 ppm)	Высокая	Высокая	Феррит	Низкая	Науглероживание
Низкоуглеродистая	Высокая	Высокая	Феррит	Высокая	Теплоизоляция и смазывание
Среднеуглеродистая (перитектическая)	Средняя	Средняя	Феррит + Аустенит	Неявная	Продольные трещины
Высокоуглеродистая	Низкая	Медленная	Аустенит	Низкая	Прорыв корочки

ШОС для кристаллизаторов современных УНРС является смесью оксидов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с добавками углерода различных флюсов (кальцинированная сода (Na_2CO_3), Na_2O , K_2O , Li_2O и плавиковый шпат CaF_2 и др.). В таблице 4.2 представлен типичный состав различных ШОС для кристаллизаторов УНРС, применяемых на практике в настоящее время.

В некоторые ШОС могут входить такие оксиды как TiO_2 и ZrO_2 , для обеспечения наиболее лучшего затвердевания у стенок кристаллизатора и они являются центрами начала процесса кристаллизации. С целью снижения эрозии погружного разливочного стакана, ШОС может содержать ZrO_2 до 2 мас. %. Однако, TiO_2 и ZrO_2 имеют тенденцию повышать температуру плавления смеси и таким образом снижают смазочные свойства шлака. Добавляемые флюсы с высокой вязкостью применяются для минимизации затягивания ШОС в тело слитка, но при

этом возможно негативное воздействие на смазывающие и теплопередающие свойства шлаковой плёнки в кристаллизаторе.

Таблица 4.2 – Типичный состав шлакообразующей смеси

Наименование	Содержание элементов и фаз в ШОС, мас. %	
	Главные компоненты	Сопутствующие компоненты
Стеклообразующие	SiO ₂ – от 17 до 56 Al ₂ O ₃ – от 0 до 13	Fe ₂ O ₃ – от 0 до 6
Основные оксиды	CaO – от 22 до 45	MgO – от 0 до 10
Щелочи	Na ₂ O – от 0 до 17	K ₂ O – от 0 до 5 LiO ₂ – от 0 до 5
Флюсы	F – от 0 до 15	MnO – от 0 до 5
Контроль скорости плавления	C _{своб} – от 2 до 20	–

Как видно из таблицы 4.2 в основу ШОС для кристаллизатора входит кислый оксид SiO₂, который негативно сказывается на чистоту стали по оксидным включениям из-за активного процесса окисления алюминия в жидкой стали до Al₂O₃. Несмотря на это, в мировой практике разливки чистого металла отсутствуют способы отказа от оксида кремния. Например, в начале 90-х годов прошлого века была попытка разработать ШОС не содержащую SiO₂, которая не окисляла бы металл, содержащий алюминий и титан. Было предложено использовать относительно стабильные оксиды – BaO, Al₂O₃, MgO, SrO и CaO. Система этой ШОС была CaO-Al₂O₃-SrO(-MgO) с добавками различных фторидов и углерода. Но широкого применения эти ШОС на практике пока не нашли, так как были существенные проблемы с теплопередачей в кристаллизаторе и аварийными ситуациями на УНРС [167].

Согласно рисунку 4.5 по температуре плавления (T_{break}) и вязкости ШОС, можно подобрать оптимальную смесь для 80-90 % типов размеров и марочного сортамента [97]. Значения температуры плавления ШОС для марок стали, чувствительных к трещинам (МС – среднеуглеродистая), расположены над верхней

кривой. Значения температуры плавления ШОС для марок стали, чувствительных к «прилипанию» слитка в кристаллизаторе (НС - высокоуглеродистая), лежат под нижней кривой. Значения других марок стали расположены между двумя этими кривыми. Корочка металла, формирующаяся из высокоуглеродистой стали (НС), имеет тенденцию к прочности и склонна к формированию поперечных трещин из-за процесса «подвисания» слитка в кристаллизаторе, вследствие меньшей усадки металла. На рисунке 4.5 представлена схема выбора ШОС, которая будет обеспечивать формирование толстой оболочки слитка путём увеличенного горизонтального теплового потока (теплопереноса). Это обеспечивается за счёт создания тонкой аморфной плёнки шлака с низкой температурой плавления смеси.

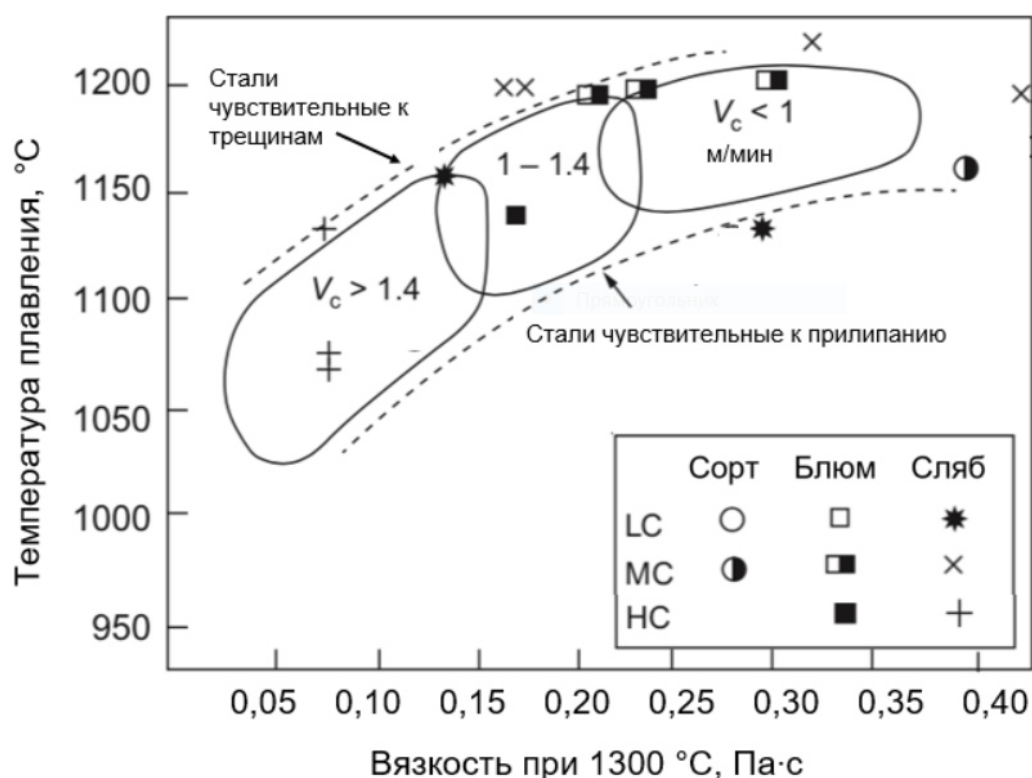


Рисунок 4.5 – Температура плавления ШОС, как функция вязкости шлака для литья слябов, блюмовых и сортовых заготовок различного марочного сортамента (LC – низкоуглеродистые стали; MC – среднеуглеродистые и перитектические стали; HC – высокоуглеродистые стали)

Существуют и другие параметры, которые не обеспечивают такой оптимальный выбор ШОС, например, нестабильный поток металла в кристаллизаторе,

колебания уровня металла в кристаллизаторе, попадание неметаллических включений из промежуточного ковша в кристаллизатор, процессы вторичного окисления металла в кристаллизаторе и др. Поэтому все эти влияющие параметры (факторы) следует минимизировать и исключать на производстве.

Изменение свойств ШОС основывается на трёх свойствах, определяющих оптимальную смазку и теплопередачу для соответствующих условий разливки (скорость вытягивания слитка и размер заготовки), а именно – вязкость, температура плавления и кристаллическое состояние шлаковой пленки между слитком и кристаллизатором.

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. Например, ручная подача или не использование электромагнитного датчика для точной регулировки скорости подачи ШОС и контроля уровня металла [209].

К параметрам возникновения нестабильности разливки стали относят [131, 186, 197, 209]:

- характеристики качания кристаллизатора;
- не прогнозируемые колебания уровня металла в кристаллизаторе (влияние оборудования и метод контроля уровня металл);
- меняющийся и нестабильный профиль потоков металла в кристаллизатор;
- образование и удаление шлаковых корок;
- не стабильный и меняющийся расход ШОС;
- различная скорость плавления ШОС;
- динамическое изменение химического состава шлака;
- толщина стенки кристаллизатора и конструкция первичного охлаждения;

- конусность или внутренний профиль кристаллизатора;
- и др.

Исходя из такого множества влияющих параметров, следует установить значимые параметры, которые будут обеспечивать стабильное производство «чистой стали» с учётом возможного влияния ШОС на качество металлопродукции.

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. На рисунке 4.6 представлена схема влияния чистоты стали на работу ШОС в кристаллизаторе, установленной на практике ЛПК, которая напрямую влияет на формирование дефектов.



Рисунок 4.6 – Влияние чистоты стали на изменение свойства ШОС в кристаллизаторе и поверхностные дефекты на горячекатаной полосе

Для «чистой стали» формируются продольные дефекты на слябе, а для стали с повышенным содержанием включений и газов образуются поперечные трещины, грубые метки качания от кристаллизатора и шлаковые включения на поверхности сляба (раскатанные загрязнения). Инструментом фиксации и установления дефектов на металлопрокате в режиме реального времени была система PARSYTEC (параграфа 3.5 главы 3). Определением природы дефектов являлись металлографические исследования, на основании которых были внесены соответствующие данные в классификатор дефектов.

Значительное количество продольных трещин было выявлено на среднеуглеродистых и перитектических сталях, у которых содержание углерода находилось в диапазоне 0,08-0,16 мас. %, к данным сталям относится сталь 3, 20КСХ, 20, 22ГЮ. При углеродном эквиваленте 0,07-0,15 мас. % выявлялись продольные трещины на стандартных (штатных) ШОС и в большей степени при разливке «чистой стали» с низким содержанием включений и газов. Принимались не корректные выводы о преимуществах технологии «чистой стали», что не приводило к комплексному совершенствованию технологии и повышению качества.

Поперечные трещины формировались на всех марках стали, но в большей степени выявлялись на среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталях. Необходимо отметить, что ШОС для разливки низкоуглеродистой стали отличалась физико-химическими свойствами по сравнению с ШОС для среднеуглеродистой стали по основности и вязкости. Для низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали основность (CaO/SiO_2) составляла 1,00 и 1,04 и вязкость – 0,08 и 0,12 Па·с соответственно.

Корректировка условий смазки и теплопередачи в кристаллизаторе путём изменения физико-химических свойств ШОС с целью минимизации дефектов

С целью минимизации поверхностных дефектов при производстве тонких слябов с толщиной от 40 до 90 мм в работе [71] представлены общие принципы корректировки условий смазки и теплопередачи в кристаллизаторе. Как показал мировой опыт производства тонкого сляба по различным технологиям (CSP, ISP, Conroll, QSP, FTSP, DSP и др.), следует внедрять мероприятия по снижению веро-

ятности образования дефектов поверхности и прорывов на УНРС [100, 115, 166, 197, 253]. К одним из таких мероприятий относится разработка специальных ШОС для кристаллизатора тонкослябовых УНРС. С появлением разливки «тонких» слябов, в мире стала актуальна реализация мероприятия по подбору ШОС, так как дефекты выявляются сразу после разливки и прокатки тонких слябов по сравнению с традиционной технологией разливки на УНРС (без совмещенной прокатки). Литературный обзор [100, 115, 166, 197, 253] показал, что данное мероприятие следует рассматривать в комплексе с корректировкой потоков металла в кристаллизаторе, с целью обеспечения равномерности распределения тепловых потоков, исключения формирования поверхностных дефектов и захвата шлака в металл.

Большинство дефектов, обнаруживаемых на поверхности непрерывнолитого металла, а особенно при разливке тонких слябов (толщиной менее 105 мм), могут быть вызваны явлениями, происходящими во время прохождения металла через кристаллизатор, образуя неблагоприятные динамические потоки металла. В свою очередь это приводит к неравномерным условиям теплопередачи между сталью и кристаллизатором, смазке на границе раздела между кристаллизатором и твёрдой корочкой металла. С целью минимизации поверхностных дефектов необходимо достаточное количество жидкого шлака в кристаллизаторе, которое регулируется путём подачи ШОС с определенной скоростью, и при этом смесь должна иметь соответствующую скорость плавления. Кроме этого, жидкий шлак должен иметь соответствующую вязкость, которая обеспечивает проникновение шлака в образующийся зазор, с целью выполнения функций смазки и теплопереноса. К другим параметрам, влияющим на смазку в кристаллизаторе, относится структура шлака (аморфная или кристаллическая) около стенки кристаллизатора, которая обычно твёрдая (температура затвердевания шлака) и поверхностное натяжение жидкого шлака. Эти факторы важны для высокоскоростной разливки металла на УНРС, для которых шлак должен иметь низкое поверхностное натяжение, чтобы исключить поступления шлака в металл за счёт меньшей адгезии между растущей корочкой металла и жидким шлаком.

На практике разливки металла на УНРС проблематично обеспечить стабильность всех процессов, происходящих в кристаллизаторе, из-за действия множества производственных факторов, например, смена сталеразливочного ковша, снижение уровня металла в промежуточном ковше, попадание ковшевого шлака и шиберной засыпки в промежуточный ковш, неконтролируемые процессы вторичного окисления и др. Предлагается не рассматривать нестационарные процессы начала и конца серийной разливки на УНРС, так как в эти периоды времени получить непрерывнолитой металл, с минимальным количеством дефектов и неметаллических включений, на практике не представляется возможным.

Важные физико-химические характеристики ШОС для разливки на тонкослябовых УНРС были установлены в работе [71]: скорость плавления ШОС (мг/с), конечная и начальная температура плавления ($^{\circ}\text{C}$), вязкость (Па·с), температура кристаллизации шлака и основность (CaO/SiO_2). Необходимо учитывать, что чем ниже температура стали и скорость разливки металла на УНРС, тем ниже должна быть конечная температура плавления и вязкость ШОС, и тем выше должна быть скорость плавления ШОС. Проведенное исследование [71] по увеличению основности ШОС с 0,93 до 1,00 показало, что снижается тепловой поток в кристаллизаторе на 25 % (с 1415 до 1060 кВт/м²), что в конечном итоге заметно снизило количество дефектов на слябе из-за влияния свойств ШОС. Аналогичные результаты получили японские исследователи [72, 253] с измерением теплового потока для разной основности смесей. Увеличение основности ШОС с 1,40 до 2,00 привело к снижению теплового потока с 1490 до 1280 кВт/м² или на 14 %.

Совместное влияние конструкции кристаллизатора и ШОС

Интенсивность теплоотвода через стенки кристаллизатора характеризуется величиной среднего удельного теплового потока. Установлено, что наибольшее количество тепла в кристаллизаторе передается вблизи зеркала металла (рисунок 4.3). Передаваемое тепло существенно зависит от химического состава стали, в частности от содержания углерода, то есть от величины доперлитной усадки. Минимальная плотность теплового потока (кВт/м²) наблюдалась при содержании углерода 0,14 мас. %, а максимальная при 0,6-0,7 мас. %. Это также объясняет ме-

ханизмы формирования дефектов в кристаллизаторе, связанных с природой кристаллизации различных марок стали.

Различные сведения о влиянии шлакового гарнисажа на величину теплоотвода по высоте кристаллизатора объясняются тем, что при исследованиях не учитывали изменение физико-химических характеристик шлака [197].

Для беспрепятственного проникновения жидкого шлака в зазор слиток-кристаллизатор и формирования жидкой прослойки на всей контактной поверхности шлака, расплавленная смесь должна быть жидкотекучей при температурах поверхности слитка. Определяющими характеристиками шлака являются: вязкость при температурах зеркала металла (около 1300 °С) и поверхности слитка на выходе из кристаллизатора, поверхностное натяжение, адгезия к разливаемому металлу и к медным стенкам, плотность расплава, его ассимилирующая способность по отношению к основному типу включений в разливаемой стали.

Основность промышленных ШОС для кристаллизаторов УНРС могут варьироваться от 0,70 до 1,35 [186, 197], в зависимости от скорости вытягивания слитка, размеров кристаллизаторов и марки стали. ШОС обычно содержит около 5 мас. % Al_2O_3 и во время разливки может происходить поглощение около 4 мас. % оксида алюминия из включений, которые содержатся в жидкой стали и формируются при окислении алюминия через шлак. Повышение Al_2O_3 в шлаке приводит к увеличению его вязкости.

Контроль теплопередачи в кристаллизаторе и основность ШОС

В работе [166] представлено, что поиск баланса между смазкой в кристаллизаторе и контролем теплопередачи осуществляется с целью оптимального плавления ШОС и проникновения расплавленного шлака в зазор слиток-кристаллизатор, что определяет стабильность разливки на УНРС. В этой же работе было отмечено главный параметр для ШОС – основность.

Повышенное значение основности CaO/SiO_2 более 1,00 обычно приводит к более кристаллической и грубой плёнке шлака, и, следовательно, к снижению теплопередачи к кристаллизатору (высокая вероятность «прилипания» и прорыва на УНРС). С другой стороны, низкая основность менее 1,00 приводит к образова-

нию аморфной плёнки шлака и, как следствие, к лучшей смазке и повышенной теплопередаче к кристаллизатору (зона образования продольных трещин). Это является подтверждением того, что разливка «чистой стали» на ШОС, которая обеспечивает удовлетворительную разливку на стали с повышенным содержанием включений и газов, может приводить к формированию продольных трещин на непрерывнолитом металле. Поэтому последующие шаги повышения качества получения «чистой стали» следует направлять на корректировку физико-химических свойств ШОС для кристаллизатора УНРС.

Дефекты металла из-за ШОС в кристаллизаторе

Механизмом захвата шлака в слиток можно управлять путём изменения технологических параметров УНРС, таких как скорость потока металла, глубина погружения стакана, дизайн погружного стакана и выходных отверстий. Для ШОС к таким параметрам можно отнести: вязкость и межфазное натяжение шлака. Повышение их приводит к изменению расхода ШОС и получения более глубоких меток от качания кристаллизатора с фрагментами захваченного шлака [166]. 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.

Влияние плит кристаллизатора на продольный дефект

В настоящее время на многих слябовых УНРС используются плиты в зоне мениска без никелевого покрытия. Основная цель данных плит – это увеличение

ресурса и ремонтпригодность с возможностью восстановления плит и многократное использование в производстве.

Покрытие медного кристаллизатора никелем (Ni) имеет ту же роль что и ШОС для кристаллизатора. Покрытие Ni является хорошим средством для уменьшения теплового потока, которое позволяет получить мягкое охлаждение и тем самым обеспечивает постепенную усадку стали для исключения продольных трещин на слябе. Существующий мировой тренд перехода на плиты кристаллизатора слябовых УНРС без никеля говорит о необходимости применения других ШОС, то есть с высокой склонностью к кристаллизации и с большей основностью.

При разливке тонких слябов следует учитывать, что тепловой поток в кристаллизаторе будет выше, чем на традиционных слябовых УНРС из-за более высокой скорости литья, то есть означает увеличение вероятности образования трещин для восприимчивых к охлаждению марок стали. При высоких скоростях литья существует начальный период кристаллизации, в котором затвердевшая тонкая корочка с высоким риском образования продольных трещин.

На практике тепловой поток на всех типах УНРС всегда повышается из-за увеличения скорости разливки. Образование трещин на поверхности сляба становится заметным, когда тепловой поток превышает определённого критического значения.

Влияние ШОС для кристаллизатора на продольный дефект на полосе

ШОС для кристаллизатора выполняет важную функцию по регулированию теплового потока в кристаллизаторе [71, 120, 197].

Вязкость, является ключевым свойством ШОС и определяет следующее:

- смазываемость корочки стали;
- глубину меток качания кристаллизатора;
- скорость эрозии погружного стакана.

С целью снижения теплового потока и минимизации образования продольных трещин на непрерывнолитом металле следует вносить корректировку по физико-химическим свойствам ШОС: повышение основности и снижение вязкости.

Таким образом, определены дополнительные значимые технологические параметры производства «чистой стали», которые могут значительно изменять содержание в металле неметаллических включений и повышать качество металла.

4.2 Влияние содержания водорода и оксидов в металле на изменение параметров теплопередачи через шлак в кристаллизаторе

В главе 3 при рассмотрении причин дефектов и прорывов на УНРС было рассмотрено влияние водорода в жидкой стали на работу ШОС. Водород воздействует на изменения физико-химических свойств ШОС, в частности при критическом его содержании и выделении из кристаллизатора может происходить снижение теплопроводности через шлак. Этот процесс наблюдается во время разливки металла на УНРС по тепловой карте. Например, при содержании водорода более 7,0 ppm (0,00070 мас. %) фиксировался процесс «прилипание» (подвисание) слитка, формировались поперечные трещины и в том числе происходил захват шлака в корочку слитка, а в некоторых случаях возникали прорывы кристаллизующейся корочки металла.

Присутствие паров воды изменяет температуру кристаллизации ШОС в сторону высоких температур за более короткое время по сравнению с инертной атмосферой аргона (без паров воды) [95]. Эта реакция усиливается наличием твёрдых оксидных неметаллических включений, которые действуют как центры зародышеобразования. Кроме того, как это было подтверждено в данном исследовании, наличие крошечных пузырьков газа в шлаковой пленке кристаллизатора изменяют физико-химические свойства ШОС. Например, пузырьки газа снижают теплопередачу, что приводит к формированию более тонкой корочки слитка. Следовательно, более тонкая корочка слитка и большие трения в кристаллизаторе могут привести к прорыву из-за «прилипания» слитка.

Содержание в стали оксидов и водорода нарушают стабильную разливку из-за возникновения дефектов и аварийных ситуаций на УНРС [209]. 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 0,00020-0,00050 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 0,00050 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. На практике при увеличении количества Al₂O₃ в шлаке происходит изменение теплового потока в кристаллизаторе по причине увеличения вязкости шлака и изменения физико-химических свойств ШОС.

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 вакуумирова-

ние металла ($[H] \leq 0,00020$ 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.

4.3 Сравнения параметров свойств шлака в кристаллизаторе для различного уровня чистоты стали по оксидам и газам

Разливка стали на УНРС с повышенным содержанием включений

На рисунке 4.7 представлена спеченная смесь ШОС с двухкальциевым силикатом и формирующие псевдо-менисковые следы в зоне мениска со стороны стенки кристаллизатора УНРС. Формирующие шлаковые корки и плёнки влияют на давление в зазоре и в итоге могут изменять глубину меток качания кристаллизатора. Такой контакт шлака со слитком может приводить к поперечным трещинам (при прокатке – это плены), а в критических ситуациях к прорыву на УНРС. Как было сказано ранее, шлаковая корка и формирующийся гарнисаж шлака также приводят к ухудшению регулировки уровня стали в кристаллизаторе для радиометрического контроля с использованием источников ионизирующего излучения. На УНРС, где применяется электромагнитный контроль уровня металла, формирующийся шлак не будет влиять на регулирование уровня металла в кристаллизаторе.



Рисунок 4.7 – Шлаковые корки и плёнки, формирующиеся в кристаллизаторе УНРС

Исследование свойств ШОС для разливки среднеуглеродистой стали

ШОС марки «В» испытано на тонкослябовой УНРС в качестве альтернативы стандартной смеси «А» для среднеуглеродистых сталей с целью улучшения качества поверхности и снижения продольных трещин (таблица 4.3). Испытания показали, что новая смесь «А» обеспечивает снижение теплообмена между сталью и стенками кристаллизатора на 12-15 %, что сказалось на улучшении качества поверхности сляба по продольным трещинам.

Таблица 4.3 – Физико-химические свойства стандартной ШОС «А» и экспериментальной ШОС «В»

Параметр ШОС	ШОС «А»	ШОС «В»
С _{своб} , мас. %	13,0	3,3
CaO/SiO ₂	1,04	1,25
T _{разм} , °C	1020	980
T _{пл} , °C	1100	1000
T _{теч} , °C	1130	1025
Вязкость при 1300 °C, Па·с	0,12	0,03

Данные из таблицы 4.3 показывают, что смесь «В» обладает следующими характеристикам:

- более высокой основностью (CaO/SiO₂), означающей её высокую склонность к кристаллизации, что обеспечивает большее снижение теплового потока от стали к стенке кристаллизатора;

- низкая вязкость гарантирует проникновение кристаллического шлака в зазор слиток-кристаллизатор;

- низкое содержание свободного углерода и низкая температура плавления увеличивает скорость расплавления смеси, что обеспечивает необходимый расход ШОС.

Таким образом, физико-химические свойства ШОС «В» позволяют снизить теплообмен между сталью и стенками кристаллизатора по сравнению со смесью

ШОС «А», что обеспечивает лучшее качество поверхности непрерывнолитого металла. Несмотря на это, свойства смеси «В» на первой плавке в серии были неудовлетворительными, когда сталь содержит более высокое количество неметаллических включений из вторичного окисления металла и обмыва футеровки промежуточного ковша на первой плавке в серии.

Рассмотрим ассимиляцию неметаллических включений в представленных смесях. С одной стороны, свойства смеси ШОС «В» были неудовлетворительными на первой плавке в серии, когда сталь содержала большее количество неметаллических включений. С другой стороны, данная ШОС обеспечивает лучшее качество поверхности, начиная с 2-й или 3-й плавки в серию. Стандартная ШОС «А» показывает обратные свойства: смесь позволяет разливать первые плавки, которые зачастую содержат больше включений и без негативных последствий на качество металла.

С целью сравнения ассимиляции включений для каждой смеси были проведены термодинамические вычисления с использованием программного пакета Thermo-Calc (таблица 4.4). Для расчёта приняли среднюю температуру разливки металла на УНРС 1530 °С и ассимиляцию следующих распространённых неметаллических включений для стали, раскисленной алюминием: Al_2O_3 , MgO и $MgO \cdot Al_2O_3$.

Результаты расчёта показали следующие закономерности:

- после добавления Al_2O_3 более 30 мас. %, первые три ШОС («А», «С» и «D») остаются полностью жидкими, в то время как добавление лишь 8 мас. % Al_2O_3 в ШОС «В» приводит к формированию твёрдой фазы в виде шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, распределённой в жидком шлаке;

- насыщение оксидом магния (MgO) происходит при добавлении 20 мас. % MgO к первым трём ШОС («А», «С» и «D»), в то время как добавление лишь 5 мас. % MgO в ШОС «В» приводит к образованию твёрдого MgO , распределённого в жидком шлаке;

- насыщение $MgO \cdot Al_2O_3$ достигается при добавлении около 27,5 мас. % $MgO \cdot Al_2O_3$ к первым трём ШОС, в то время как добавление лишь 10 мас. %

$MgO \cdot Al_2O_3$ в ШОС «В» приводит к образованию твёрдой магниевой шпинели, распределённой в жидком шлаке.

Таблица 4.4 – Физико-химические свойства ШОС для термодинамических расчётов и оценки ассимиляции неметаллических включений

Параметр ШОС	ШОС «А»	ШОС «С»	ШОС «D»	ШОС «В»
SiO ₂ , мас. %	27,5	33,6	30,0	26,1
CaO, мас. %	28,5	35,3	33,0	32,6
MgO, мас. %	1,0	4,2	1,0	6,9
Al ₂ O ₃ , мас. %	5,8	3,5	4,3	5,8
Na ₂ O+K ₂ O, мас. %	6,8	4,8	8,8	9,0
Li ₂ O, мас. %	0,6	–	0,5	0,7
Fe ₂ O ₃ , мас. %	1,3	2,6	1,0	0,7
MnO, мас. %	2,8	–	3,0	–
F ⁻ , мас. %	7,0	9,2	7,8	9,5
C _{своб} , мас. %	13,0	4,6	5,8	3,3
C _{общ} , мас. %	15,5	5,5	8,3	5,1
CaO/SiO ₂	1,04	1,05	1,10	1,25
T _{разм} , °C	1020	1050	1020	980
T _{пл} , °C	1100	1075	1100	1000
T _{теч} , °C	1130	1100	1130	1025
Вязкость при 1300 °C, Па·с	0,12	0,10	0,07	0,03

Первые три ШОС («А», «С» и «D») обладают гораздо большей способностью ассимилировать неметаллические включения, так как остаются однофазными жидкостями, которые не ухудшают смазывающие свойства. ШОС «В», вследствие своего химического состава, при поглощении малого количества неметаллических включений превращается в двухфазную систему, теряя свои изначальные свойства. Улучшения качества поверхности сляба при использовании ШОС «В» можно объяснить эффектом экранирования теплового потока в сравнении со стандартной ШОС «А».

Полученная в ходе исследования информация указывает на то, что ШОС «D» обладает промежуточными характеристиками экранирования теплового потока, в сравнении со штатной «А» и опытной «В». ШОС «D» обладает теми же свойствами, что и ШОС «А» относительно ассимиляции неметаллических включений и при этом сохраняются смазочные свойства в начале серии.

Анализ шлаковой корки, образовавшейся в кристаллизаторе для ШОС «А»

Для исследования изменения химического состава ШОС «А» во время разливки на УНРС, был проведён сравнительный анализ смеси со шлаковой коркой в кристаллизаторе. Содержание углерода в обоих случаях не учитывалось, так как углерод сгорает при температурах разливки.

Химический состав шлаковой корки определяли на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV, оснащённом рентгеновской трубкой с железным анодом и высокоскоростным детектором D-teX Ultra. Напряжение и ток трубки составляли 40 кВ и 30 мА. Сканирование проводили в диапазоне углов 2θ (10...100)° со скоростью 2°/мин и шагом 0,02°. Расшифровку дифрактограмм и количественную оценку фазового состава методом Ритвельда выполняли в программе PDXL с использованием баз кристаллографических данных COD-2013 и PDF2-2009. Образцы содержали аморфную фазу шлака в количестве около 10-15 мас. %. Для определения химического состава отложений был проведён микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) при помощи сканирующего электронного микроскопа Ultra-55, оснащённого спектрометром энергетической дисперсии INCA Energy 450X-xMAX.

Проба шлаковой корки, образованной смесью «А», была взята при разливке среднеуглеродистой стали 20 на тонкослябовой УНРС (размер сляба 1215X90,5 мм и скорость разливки 3,9 м/мин), которая имела следующий химический состав, представленный в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Химический состав разливаемой стали 20 на УНРС (мас. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Al _{окс}	Cu	N	Ca
0,18	0,22	0,40	0,0053	0,0013	0,07	0,0196	0,0006	0,20	0,0094	0,0011

Сумма компонентов взята за 100 %, как показано в таблице 4.6, вместе с разницей в составе.

Таблица 4.6 – Сравнение химического состава ШОС «А» и корки шлака из кристаллизатора УНРС в пересчете на 100 %

Параметр ШОС	ШОС «А»	Шлаковая корка из кристаллизатора	Разница
SiO ₂ , мас. %	34,0	33,0	-1,0
CaO, мас. %	35,6	39,0	3,4
MgO, мас. %	1,0	1,2	0,2
Al ₂ O ₃ , мас. %	7,2	8,0	0,8
Na ₂ O+K ₂ O, мас. %	8,4	9,0	0,6
Fe ₂ O ₃ , мас. %	1,6	0,7	-0,9
MnO, мас. %	3,5	1,2	-2,3
F ⁻ , мас. %	8,7	7,9	-0,8
Итого:	100	100	0
CaO/SiO ₂	1,04	1,18	–

Из таблицы 4.6 видно снижение фтора на 0,8 мас. %, что считается нормальным для условий непрерывной разливки УНРС, так как при высокой температуре всегда снижается концентрация летучих веществ, к которым относится фтор. Содержание оксидов SiO₂, Fe₂O₃ и MnO снижается в следствии того, что они являются окислителями для металла. Последствием вышеуказанного снижения является то, что содержание других компонентов в шлаке (Al₂O₃, MgO, CaO) наоборот возрастает. Самым главным здесь является увеличение отношения CaO/SiO₂ от 1,04 до 1,18. Повышение отношения CaO/SiO₂ означает склонность к кристаллизации, вместе с относительно большей вязкостью (0,12 Па·с), что приводит к увеличению образования шлаковой корки. Чтобы исключить данное отрицательное свойство на практике, необходимо выполнять «тонкую» корректировку химического состава ШОС через основность и вязкость шлака. Например, ШОС марки «D» имеет больше преимуществ по сравнению со стандартной смесью марки «А» для текущей технологии производства стали, когда проводились испытания (таблицу 4.4).

Разливка «чистой стали» на УНРС

Разливка «чистой стали» с применением ШОС низкой основностью (менее 1,1), которая применялась для условно «грязной стали», может приводить к образованию продольных трещин. Практика разливки на тонкослябовой УНРС пока-

зала, что при содержании в расплаве общего кислорода $\leq 0,0020$ мас. % и водорода $\leq 0,00050$ мас. % количество продольных трещин на слябе увеличивается (таблица 4.7). 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 вакуумированном среднеуглеродистом металле для всех видов толщин слябов (таблица 4.8).

Таблица 4.7 – Влияние содержания водорода в жидкой стали на образование продольных трещин для среднеуглеродистого сортамента

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

Таблица 4.8 – Влияние вакуумирования среднеуглеродистой стали на образование продольных трещин на слябе толщиной 90,5 и 105 мм

Технологический маршрут	Уровень доработки металлопроката по продольной трещине			
	Толщина сляба 90,5 мм		Толщина сляба 105 мм	
	Количество слябов в выборке	% слябов с трещинами	Количество слябов в выборке	% слябов с трещинами
ДСП-УКП-УНРС	4937	0,7	1647	0,7
ДСП-УКП-ВД-УНРС	2554	3,9	2018	2,6
Всего:	7491	1,8	3665	1,7

Далее представлены три примера разливки серии плавок с разным содержанием водорода и один пример с общим кислородом и включениями в жидкой стали. На всех сериях плавок скорость вытягивания слитка и ширина сляба не менялись, то есть оценка влияния выполнялась максимально по содержанию в металле газов и включений. На данных сериях плавок, в режиме реального времени, осуществлялось автоматическое вычисление теплового потока отдельно по каждой из широких плит кристаллизатора УНРС. В расчётах были приняты фактические данные по разнице температур воды, выходящей из плиты и входящей в плиту кристаллизатора, расход воды (л/мин), площадь плиты в зависимости от ширины разливаемого сляба (m^2), а также была принята плотность воды 992 кг/м^3 и удельная теплоёмкость воды $1,16 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ для температуры воды $\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Пример 1. Влияние содержания водорода для стали без вакуумной обработки

На рисунке 4.8 представлен пример снижения теплопередачи в кристаллизаторе через уменьшения теплового потока на $13,5 \%$ на широких плитах. Снижение теплового потока было отмечено с третьей плавки до седьмой с 1703 до 1472 кВт/м^2 (чёрная линия – по малому радиусу), которое было обусловлено увеличением водорода с $6,1$ до $8,5 \text{ ppm}$. Первую и вторую плавку не брали в анализ, так как первая плавка была вакуумированная ($\text{H} - 0,00020 \text{ мас. } \%$ или $2,0 \text{ ppm}$), а на второй плавке выполнено снижение скорости вытягивания слитка с $3,2$ до $3,0 \text{ м/мин}$.

Пример 2. Влияние содержания водорода в жидкой стали с вакуумной обработкой

На рисунке 4.9 представлен другой пример снижения теплопередачи через уменьшение теплового потока на $8,3 \%$ в кристаллизаторе на широких плитах. Снижение теплового потока было отмечено в конце серии с четвертой на пятую плавку с 1974 до 1810 кВт/м^2 , которое было обусловлено увеличением водорода с $2,0$ до $7,4 \text{ ppm}$ в жидком металле.

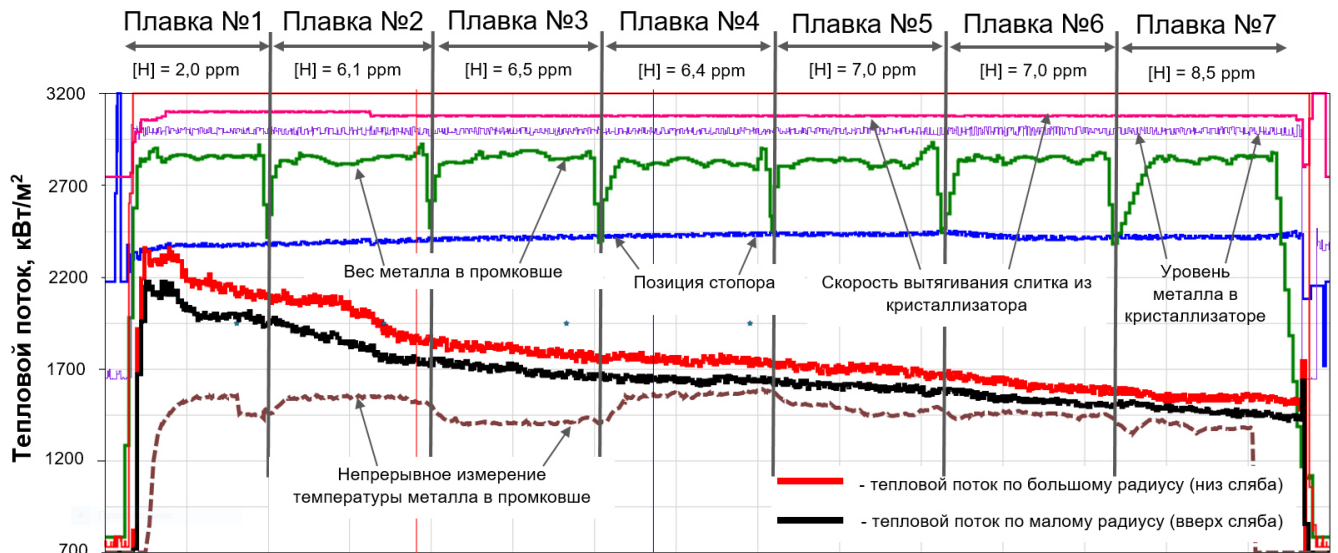


Рисунок 4.8 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС среднеуглеродистой стали KE155 ([C] – 0,30 мас. %; [Mn] – 1,29 мас. %; [Si] – 0,32 мас. %; [Al] – 0,027 мас. %); скоростью вытягивания слитка 3,0 м/мин; размер сляба 1630X105 мм²

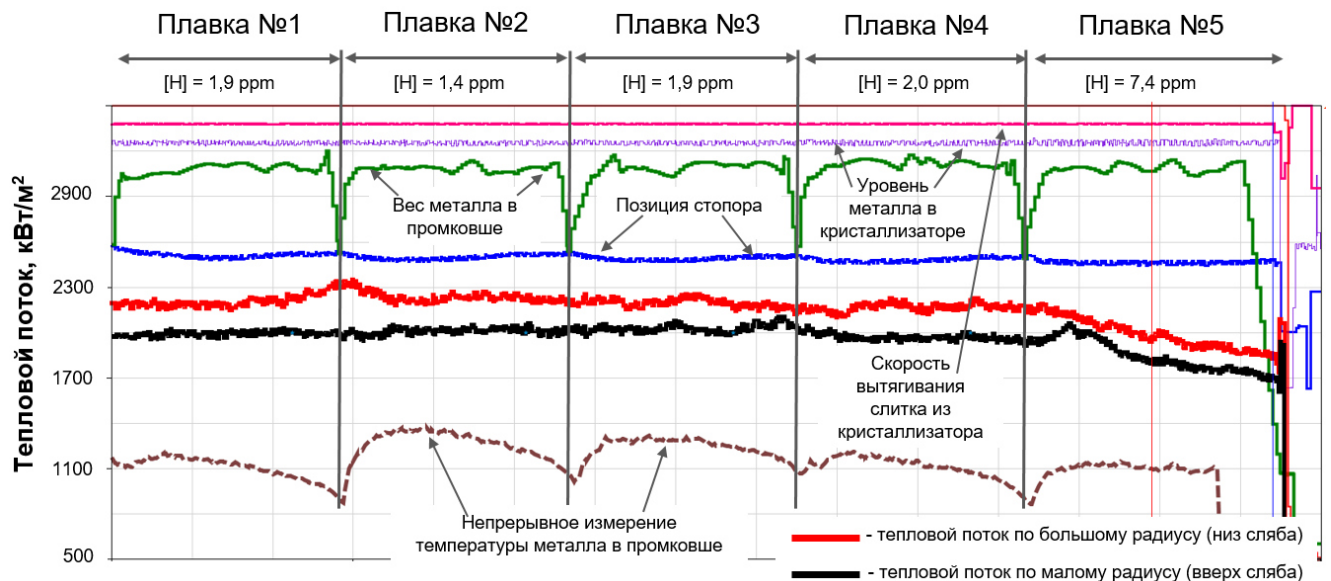


Рисунок 4.9 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС низкоуглеродистой стали 09Г2С ([C] – 0,06 мас. %; [Mn] – 1,35 мас. %; [Si] – 0,53 мас. %; [Al] – 0,026 мас. %); скоростью вытягивания слитка 3,2 м/мин; размером сляба 1410X105 мм²

Пример 3. Влияние содержания водорода в жидкой стали с вакуумной обработкой

На рисунке 4.10 представлен пример изменения теплопередачи во время серии плавков на УНРС из-за различного содержания водорода в металле промежуточного ковша. Установлено увеличение теплового потока в кристаллизаторе

по широкой плите в первом случае с 2166 до 2346 кВт/м² на ~8,3 % (снижение концентрации водорода 7,5 до 1,8 ppm). Во втором случае было увеличение теплового потока с 2065 до 2358 кВт/м² на ~14,2 % (снижение водорода 2,9 до 1,6 ppm за счёт более продолжительной обработки плавки № 7 на вакууматоре, чем на плавке № 6 на 9 минут).

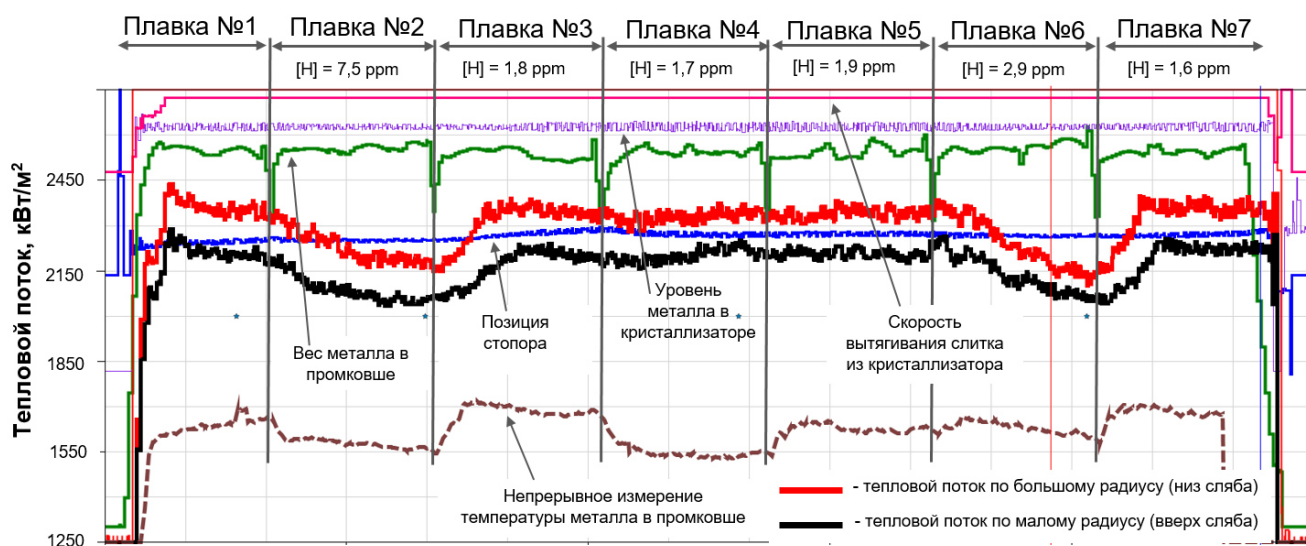


Рисунок 4.10 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС низкоуглеродистой стали Ст2ПС ([C] – 0,06 мас. %; [Mn] – 0,08 мас. %; [Si] – 0,08 мас. %; [Al] – 0,022 мас. %); скорость вытягивания слитка 3,7 м/мин; размер сляба 1290X90,5 мм²

Пример 4. Влияние содержания общего кислорода в жидкой стали

На рисунке 4.11 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. 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 ($Al_{окс}$) 0,0025 мас. % (снижение с 0,0033 до 0,0009 мас. %). На всех плавках содержание водорода было одинаковым, то есть его влияние в этом примере было не решающим.

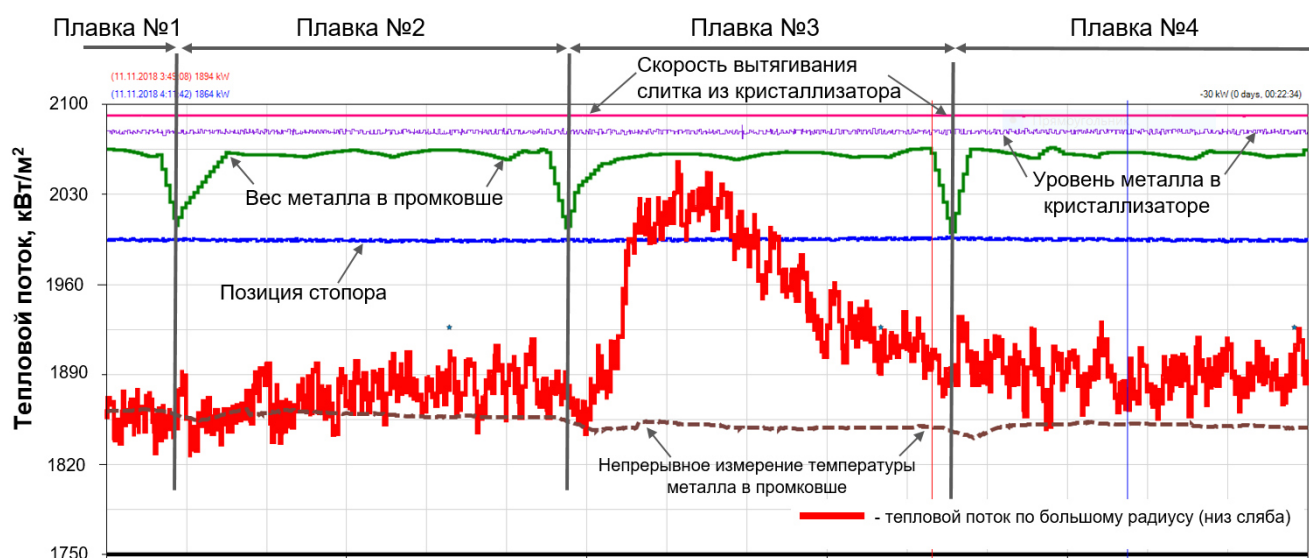


Рисунок 4.11 – Тренд технологических параметров разливки на тонкослябовой УНРС среднеуглеродистой стали KEI55 ([C] – 0,30 мас. %; [Mn] – 1,29 мас. %; [Si] – 0,29 мас. %; [Al] – 0,025 мас. %; скорость вытягивания слитка 3,2 м/мин; размер сляба 1580X90,5 мм²

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 разливки.

4.4 Разработка алгоритма подбора шлакообразующей смеси кристаллизатора для разливки «чистой стали» на УНРС

На рисунке 4.12 представлена схема поиска оптимума в свойствах ШОС кристаллизатора (трение и теплоперенос) для разливки «чистой стали» на УНРС с минимальным количеством дефектов на металле и аварийных ситуаций во время разливки. В случаях получения «чистой стали» как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах следует осуществлять корректный подбор соответствующих ШОС, а чаще всего незначительное изменение таких показателей шлака как вязкость, основность и скорость плавления будет решающими в успехе производства «чистой стали» на действующих УНРС.

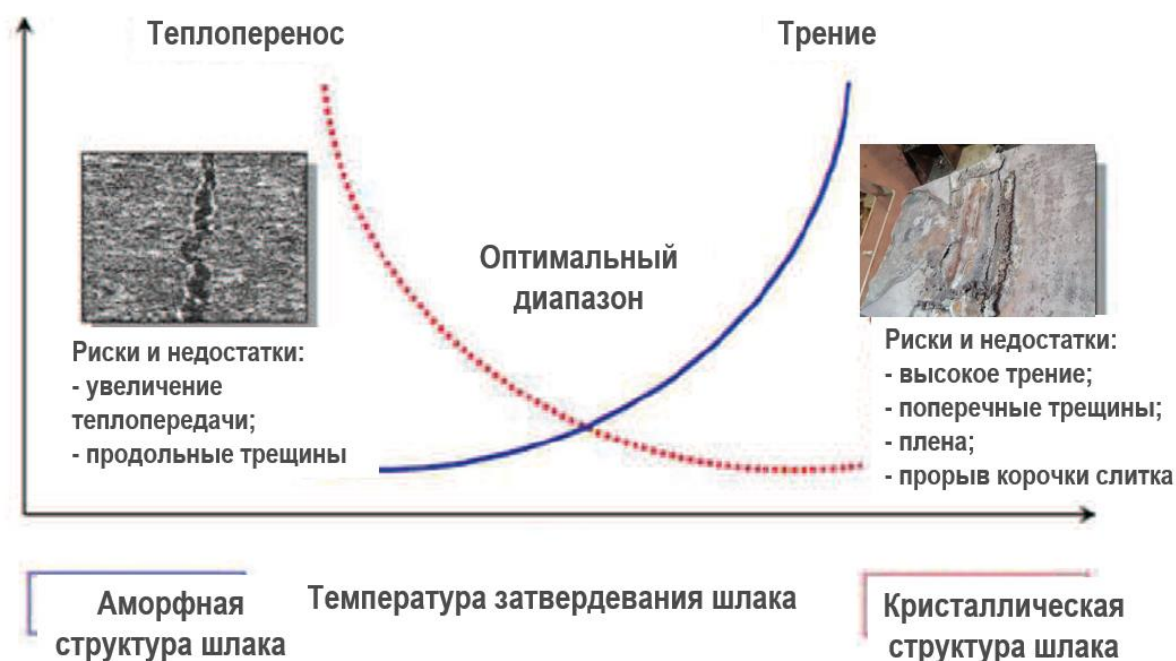


Рисунок 4.12 – Влияние химического состава и свойств ШОС на температуру кристаллизации шлака в кристаллизаторе и возможные риски на УНРС

С целью оптимального выбора ШОС для разливки «чистой стали» на УНРС необходимо выполнить следующее. Во-первых, стабилизировать процесс на выплавке и внепечной обработке стали по получению металла с низким содержанием оксидов в сталеразливочном ковше. Во-вторых, решить задачи, связанные со вторичным окислением между сталеразливочным и промежуточным ковшами и в самом промежуточном ковше. Улучшить технологию шлакового режима в промежуточном ковше, а также исключить попадание ковшевого шлака и шибровой засыпки в промежуточный ковш в периоды смен сталеразливочных ковшей. Далее совместными усилиями и знаниями как с производителем ШОС, так и с производителем стали следует осуществлять выбор оптимального ШОС из существующих или при необходимости выполнять соответствующую корректировку физико-химических свойств ШОС по выбору оптимального плавления смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор. Новая улучшенная ШОС для кристаллизатора будет на практике обеспечивать оптимальную смазку и теплоперенос.

Выводы по главе 4

1. 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.

2. Опытным путём было установлено, что влияние ШОС на теплопередачу от металла к кристаллизатору может составлять от 6 до 15 %, а конструкция кристаллизатора до 4 %. При этом следует разделять и рассматривать отдельное влияние на теплопередачу как ШОС, так и кристаллизатора. 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.

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

4. Необходимо рассматривать как отдельное влияние водорода и оксидов в металле, так и их совместное комплексное влияние на изменение параметров теплопередачи через шлак в кристаллизаторе. В целях исключения влияния водорода и общего кислорода рекомендуется выполнять вакуумирование металла и поддерживать в нём содержание включений на низком уровне (общий кислород менее $\leq 0,0020$ мас. %), которые снижают и исключают воздействие на физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе. Как показала практика, в случае повышенного содержания в металле газов, получить стабильные и воспроизводимые свойства шлака в кристаллизаторе не представляется возможным.

5. Разработанный алгоритм подбора ШОС для разливки «чистой стали» на УНРС заключается в стабилизации процесса выплавки и внепечной обработки стали по получению низкого содержания оксидов в сталеразливочном ковше и решению задачи получения «чистой стали» в промежуточном ковше. И только после этого следует осуществлять подбор оптимального ШОС для кристаллизатора и при необходимости выполнять соответствующую «тонкую» корректировку физико-химических свойств ШОС по выбору оптимального плавления смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор.

6. Представленный в этой главе разработанный комплекс технологических мероприятий производства «чистой стали» для всей технологической цепочки (от выплавки до кристаллизации металла) обеспечивает стабильный и достаточно высокий выход годной продукции, вследствие исключения невозпроизводимых результатов по качеству стали, то есть поверхностных и внутренних сталеплавильных дефектов в металлопрокате из-за неметаллических включений и газов.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ ЧИСТОТЫ СТАЛИ

5.1 Влияние содержания в металле общего кислорода, азота, водорода, серы, фосфора на чистоту стали и качество металлопродукции

Термин «чистая сталь» опирается на содержание в ней следующих примесей и газов: $[O]_{\text{общ}}$, $[H]$, $[N]$, $[S]$ и $[P]$. Основное внимание уделяется чистоте стали по содержанию общего кислорода, который определяет концентрацию оксидных включений. Также на некоторых марках сталей углерод является вредной примесью, который ухудшает качество стали по глубокой вытяжке и электромагнитным свойствам. Небольшое содержание неметаллических включений в стали (~0,01-0,03 об. %) оказывают существенное влияние на её свойства [103]: предел прочности, пластичность, вязкость, предел усталости, коррозионная стойкость, свариваемость, полируемость и обрабатываемость резанием и др.

На рисунке 5.1 представлена общая схема влияния примесей и газов на эксплуатационные свойства стали [208].

В настоящее время во всем мире очень серьезно относятся к повышению прочности (вязкость) и пластичности стали (особенно одновременно), а также к уменьшению металлоёмкости конечных изделий [197]. Решающую роль играет снижение концентрации неметаллических элементов в стали.

Влияние серы и кислорода проявляется через оксидные и сульфидные неметаллические включения, которые негативно влияют на усталостную прочность, пластичность, способность к холодной деформации, уровень низкотемпературной вязкости и коррозионную стойкость [209]. Об негативном влиянии оксидов и сульфидов подробно описано в первой главе диссертации. На некоторых марках стали серу специально добавляют в металл для повышения обрабатываемости резанием. Однако, радикальным способом уменьшения вредного влияния серы на свойства стали является понижение её содержания [118].

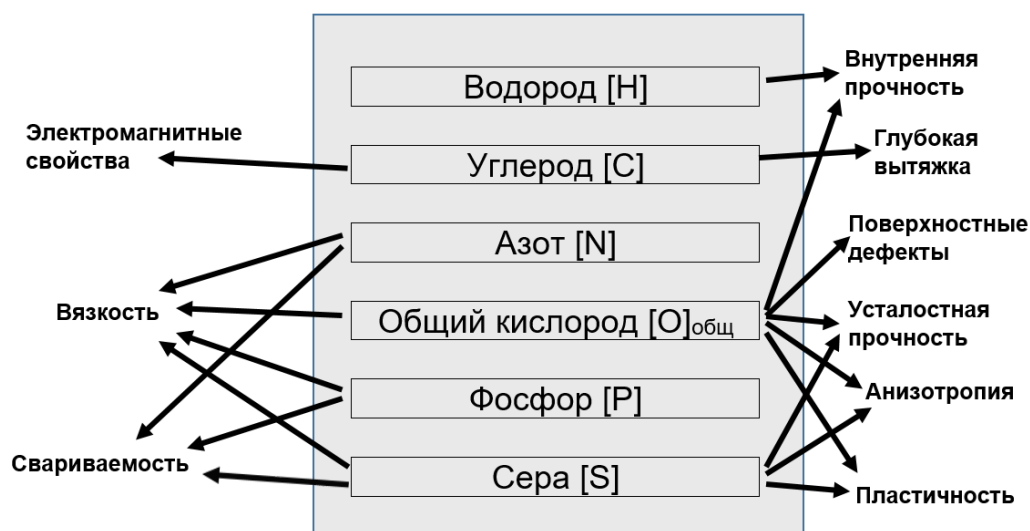


Рисунок 5.1 – Влияние неметаллических элементов на свойства стали

Фосфор с железом образует твёрдый раствор, приводя к повышению закаливается и склонности к охрупчиванию (понижает ударную вязкость), а также способствует отпускной хрупкости, то есть вызывает хладноломкость стали. За счёт образования твёрдого раствора фосфор интенсивно упрочняет и ослабляет межфазные границы вследствие образования сегрегаций [37, 171], то есть имеет значительное влияние для высокоуглеродистых марок стали. Сталь для трубопроводов является одной из самых требовательных к низкому содержанию фосфора. Для транспортировки агрессивных газов необходимо иметь фосфора не более 0,02 мас. %, а желательно не более 0,01 мас. %. Содержание фосфора менее 0,01 мас. % будет незаменимым для эксплуатации металла при низких температурах. Следует отметить, что в некоторых случаях фосфор желательный элемент, так как он, создавая хрупкость, облегчает обрабатываемость стали режущим инструментом, а в присутствии меди повышает сопротивление коррозии.

Влияние азота проявляется через повышение закаливаемости со снижением пластических и вязких свойств стали, формирование перлита и цементита со снижением пластичности, совместное влияние с углеродом для трансформаторных сталей проявляется через увеличение потерь на гистерезис, охрупчивания стали из-за выделения карбидов и нитридов по границам зерен (излишняя карбонитридная фаза). Азот существенно снижает сопротивление хрупкому разруше-

нию стали [171]. Сталь, раскисленная алюминием, не склонна к старению, то есть падению ударной вязкости с течением времени хранения или эксплуатации стальных изделий из-за возможного расположения нитридов железа по кристаллографическим плоскостям [73, 117]. Совместное влияние азота и алюминия на качество стали было рассмотрено для температурного провала пластичности во время охлаждения непрерывнолитого металла на УНРС в параграфе 3.5 главы 3. Рекомендуется иметь содержание азота в стали на низком уровне с учётом возможности технологии.

Кроме негативного влияния азот применяется как легирующий элемент для повышения прочностных свойств (нитридное упрочнение) и измельчение зерна, коррозионной стойкости и немагнитных свойств, а также стабилизации γ -фазы аустенитной коррозионностойкой стали (замена дорогостоящему Ni). Улучшение механических свойств выражено формированием раствора, пересыщенного азотом. Присутствие атомов азота, внедренных в решётку аустенита, вызывает её искажение, вследствие чего повышается прочность и не ухудшаются другие свойства. Стабилизируется γ -фаз вследствие расширения области её существования [117].

Водород не образует соединений с железом (гидридов), поэтому он может выделяться из металла. Водород растворяется в железе и его сплавах в атомарном (ионном) состоянии. Атомы (ионы) водорода из-за своих малых размеров распределяются в промежутках между атомами железа, образуя растворы внедрения [116]. При этом водород снижает пластичность, увеличивает хрупкое разрушение, формирует флокены, светлые пятна, свищи, расслои, снижает коррозионную стойкость стали (водородная коррозия), снижает сопротивление деформации [34, 82, 116, 155].

В высокотемпературной области выделение водорода происходит из неметаллических включений. Данный процесс может служить причиной образования дефектов непрерывнолитого металла: подкорковые и поверхностные пузыри, плёны, вздутия (блистеринг) и др. К низкотемпературной области относятся дефекты готового проката: флокены, холодные трещины, образование которых обу-

словлено выделением водорода из металлической матрицы. Поэтому водород может косвенно влиять и на качество поверхности металла и его содержание не желательно для технологии непрерывной разливки стали на современных УНРС, так как в процессе выделения из металла влияет на физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе (глава 4). Удаление водорода из жидкого металла в процессе плавки и после неё является важной задачей в сталеплавильном производстве.

Образованные азотом и кислородом хрупкие неметаллические включения ухудшают свойства металла. Углерод, кислород и азот – это примеси внедрения, потому что их растворимость в α -железе (феррите) незначительна, но с понижением температуры эта растворимость резко уменьшается и в условиях обычного охлаждения стали, после деформации металла, образуется пересыщенный твёрдый раствор этих элементов в α -железе. Все эти элементы влияют на вязкие свойства, уменьшая ударную вязкость и резко повышая порог хладноломкости [37, 171].

Таким образом, учитывая применение готовой металлопродукции, содержание в металле общего кислорода, азота, водорода, серы, фосфора следует снижать и регламентировать по максимально допустимой их концентрации.

5.2 Разработка дифференцированного подхода к требованиям технологии производства «чистой стали» и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства

«Чистая сталь» включает в себя множество концепций, основанных на выполнении запросов клиентов (потребителей). «Чистую сталь» можно производить разными способами в зависимости от имеющегося оборудования и требований потребителей. Общей чертой производства «чистой стали» является жесткий контроль процесса наряду с постоянным контролем. Обеспечение качества металлопродукции необходимо и требует значительных улучшений в современной металлургии. Отсутствуют препятствия для получения «чистой стали», так как про-

мышленные процессы доступны, достаточно изучены и контролируются. Основными проблемами, которые необходимо решить, остаются отклонения (нарушения), которые происходят в промышленной действительности (люди, документация, материалы, технология не учитывает происходящую действительность в цехе) [152, 153, 184, 185, 187, 188, 191-195, 204, 210-212]. Это требует постоянного, непрерывного совершенствования процессов и оборудования, а также дальнейшего развития систем обеспечения качества для достижения контроля возможных воздействий [100].

В случае производства «чистой стали» в сталеплавильном цехе должно быть предусмотрено сталеплавильное оборудование, которое сможет без особых усилий произвести данную сталь в сталеразливочном ковше, а также разлить сталь на УНРС с сохранением чистоты в непрерывнолитом металле.

В настоящее время в современном производстве применяются два способа выплавки стали – это в кислородном конвертере и в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Производство мартеновской стали не учитывается, так как данная технология в ближайшее время будет полностью вытеснена электросталью или конвертерной сталью. Качество стали, выплавленной на чистой шихте в кислородном конвертере (жидкий чугун и металлолом), может быть сопоставимо с выплавкой стали в электродуговых печах (металлолом, DRI (ПВЖ), ГБЖ, твердый чугун и пр.). Еще 30 лет назад считалось, что самая качественная сталь может производиться только в электропечах, но в настоящее время, из-за развития технологии и техники в металлургии, качество стали сопоставимо для всех способов производства, за исключением случаев работы сталеплавильного агрегата на вторичном сырье (металлолом).

Считается, что есть возможность производить сталь с низким содержанием включений, с помощью современного процесса выплавки и внепечной обработки стали, улучшения качества огнеупоров и оптимизированного управления производством [42, 192, 210-212]. В настоящее время «чистая сталь» уже является конкурентоспособным материалом и сохраняет свое превосходство в индустрии материалов. Чистота стали является важным фактором её качества, а потребность

в более чистой стали растёт с каждым годом. Требования к «чистой стали» включают следующее: низкое содержание серы, фосфора, общего кислорода, водорода (включая иногда углерод), азота, минимальное количество микровключений и макровключений. В меньшей степени «чистая сталь» также может включать в себя низкие концентрации посторонних элементов, таких как свинец, цинк, селен и т.д. [42].

Таким образом, повышение чистоты стали становится важной задачей в развитии технологии чёрной металлургии. Основным направлением сталелитейной промышленности является производство марок стали особой чистоты для различных ответственных применений. В основном это связано с жесткими требованиями к составу и качеству со стороны конечных потребителей.

Борьбу за чистую и надежную (вязкую) сталь проводят традиционно с помощью разных способов выплавки и внепечной обработки стали. Вакуумные процессы в ковше направлены на удаление газов и их применяют в комплексе к обычным приемам раскисления и рафинирования стали от вредных примесей. Современные шлаковые процессы позволяют глубоко очищать металл от серы, например, наведение шлака с повышенной сульфидной емкостью или обработка металла синтетическими шлаками. Второе мероприятие теряет свою актуальность в современной металлургии, поскольку технология выплавки и внепечной обработки стали достигла больших успехов в процессах рафинировки и десульфурации металла без использования синтетического шлака. В случае необходимости получения стали с низким и ультранизким содержанием серы применяется установка ковш-печь и вакууматор, а также набор других видов агрегатов внепечной обработки в зависимости от исходного качества и вида металлошихты, из которой выплавляется сталь (металлолом, чугуны, горячебрикетированное железо (ГБЖ) или прямовосстановленное железо (ПВЖ) и др.) [197, 204, 236].

Таким образом, современная сталь производится по двум основным технологическим маршрутам: доменная печь – кислородный конвертер и металлошихта – дуговая сталеплавильная печь (рисунок 5.2). Существуют также варианты комбинации этих маршрутов. Основное различие между ними – это вид сырья, кото-

рое потребляется. Для первого маршрута – это преимущественно железная руда, уголь и металлолом, а на маршруте ДСП сталь в основном выплавляется на вторичном сырье, то есть на металлоломе [152, 153, 184, 185, 187, 204]. В зависимости от конфигурации завода и наличия переработанной стали, на маршруте с ДСП могут использоваться и другие источники металлического железа: железо прямого восстановления (ПВЖ и ГБЖ) и чугуны. По процессу внепечной обработки стали могут быть применены различные варианты с оборудованием для обоих технологических маршрутов.

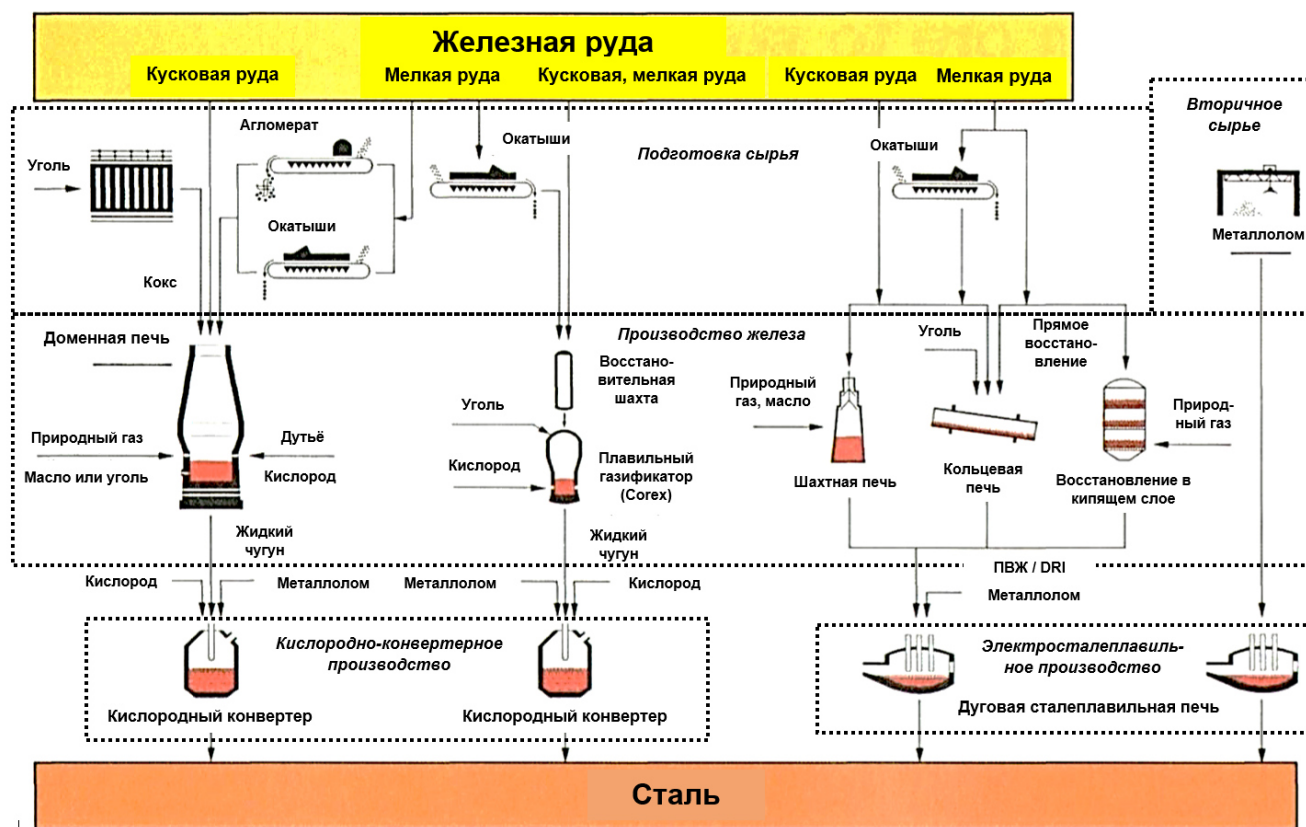


Рисунок 5.2 – Основные технологические маршруты производства железа и стали [130]

По последним данным Ассоциации World Steel [274] примерно 70,7 % мировой стали производится с использованием доменной печи и кислородно-конвертерного производства. Около 28,9 % стали производится электросталеплавленным способом, в том числе с использованием технологии прямого восстановления железа. Стоит отметить, что мировое увеличение производства металлургии

ванного продукта (ПВЖ и ГБЖ) с 1970 по 2018 год увеличилось с 1 до 100 млн. тонн в год [274]. В 2018 году по технологии MIDREX в мире было произведено 63,5 % металлизированного продукта, по технологии HYL (Energron) – 15,5 %, по процессу использования кольцевой печи – 20,2 % и оставшиеся 0,8 % по другим технологиям. Продолжающийся тренд роста производства металлизированного продукта будет наблюдаться и в будущем. Третья технология производства стали – это выплавка стали в мартеновской печи, которая составляет около 0,4 % от мирового производства стали. Мартеновское производство энергоёмкое и находится на стадии ликвидации из-за экологических и экономических недостатков.

Фосфор частично удаляется металлургическими приемами и при этом не достигается высокая степень очистки металла от него. Высокая чистота стали по фосфору получается при использовании высокочистой шихты [37, 236].

В таблице 5.1 представлены данные по лучшим доступным практикам работы металлургических заводов в мире [64, 73, 197, 204, 209, 236, 242, 267] по низкому содержанию в металле фосфора и азота. Другие вредные примеси (кислород, сера, водород) легко могут быть понижены в процессе дальнейшей внепечной обработки стали с использованием соответствующих агрегатов (ковш-печь и вакууматор и др.).

Таблица 5.1 – Сравнение содержания фосфора и азота в жидком полупродукте, получаемого после выпуска плавки в сталеразливочный ковш, с учётом химического состава ферросплавов, содержащих фосфор и азот

Химический элемент в стали	Технологический маршрут производства железа и стали		
	Доменная печь – кислородный конвертер	Прямое восстановление железа (100 %) – ДСП	Металлом (не менее 80 %) с учётом твёрдого чугуна и/или ГБЖ – ДСП
[N], мас. %	< 0,005	< 0,005	< 0,010
[P]*, мас. %	< 0,020	< 0,008	< 0,012

*восстановление фосфора из сталеплавильного шлака не учитывается, то есть принято, что количество шлака попадает в ковш не более 2,0 кг на тонну жидкой стали

В основном фосфор в конвертерном производстве поступает из железной руды и в незначительных количествах из-за шлакообразующих материалов и добавок. В этом маршруте содержание фосфора в чугуне может быть от 0,010 до 0,150 мас. % [242]. В электросталеплавильном производстве основной источник фосфора – это металлолом, металлизированное железо, чугун и различные шлакообразующие материалы. Металлолом может содержать фосфор от 0,010 до 0,040 мас. %. В продуктах прямого восстановления (ПВЖ и ГБЖ) высокого качества фосфора может быть около 0,010-0,015 мас. % и низкого качества до 0,035 мас. %. В перedefельном твёрдом чугуне для ДСП содержание фосфора ограничивается до 0,080 мас. % (среднее – 0,050 мас. %). В итоге, суммарное содержание фосфора в металлошихте для ДСП может быть от 0,010 до 0,070 мас. %, то есть ниже, чем по маршруту доменная печь – кислородный конвертер.

Дополнительный положительный эффект по чистоте стали при работе ДСП на 100 % ПВЖ (DRI) – это снижение азота по верхней границе с 0,0080 до 0,0040 мас. %. Согласно представленного обзора [267] использование в шихте 100 % ПВЖ в жидком полупродукте, выплавленного в ДСП, возможно получать азот около 0,0030 мас. %.

В маршруте для конвертерного производства дефосфорация вызывает трудности из-за высокой зависимости от качества железной руды и минимального удаления его в доменной печи. У предприятий, работающих на чугуне, имеются трудности с получением низкой концентрации фосфора в металлопродукции, но есть исключения, когда используется высококачественная низкофосфористая руда. В таком случае содержание фосфора может быть для всех маршрутов примерно одинаковое – до 0,070 мас. %.

Исходя из таблицы 5.1 видно, что самую «чистую сталь» по фосфору и азоту следует производить по маршруту с использованием металлизированного железа, а также, в некоторых случаях, в зависимости от качества исходного сырья по другим маршрутам. Следует также отметить, что в электросталеплавильном производстве возможно получить чистый жидкий полупродукт по азоту и фосфору только с применением металлизированного железа.

Далее в процессе внепечной обработки стали возможно осуществлять рафинирование стали от серы и газов с применением различных агрегатов внепечной обработки [42, 197, 209, 244, 267]. Вакуумированный металл обладает более высокими свойствами вследствие повышенной чистоты по неметаллическим включениям и отсутствием растворенных газов водорода, азота и кислорода.

Первоначально вакуумирование в основном использовалось для удаления водорода. Однако позже вакуумирование стало применяться для производства сверхнизкоуглеродистых марок стали типа ULC с содержанием углерода 30 ppm (0,0030 мас. %) или менее. Кроме этого, вакуумная обработка металла крайне необходима для производства IF-стали с содержанием углерода и азота 30 ppm или меньше. В настоящее время практически каждый производитель высококачественной стали и «чистой стали» применяет вакуумирование [64, 88].

В процессе вакуумирования снижается содержание водорода до уровня 0,5-1,5 ppm, удаляется 20-50 % начального содержания азота и возможно получить низкое содержание общего кислорода (ниже 0,0020 мас. %), то есть снижение оксидных включений. Вакуумирование возможно производить как в камерном вакууматоре (VD), так и в циркуляционном (RH). В настоящее время гораздо более распространены комбинированные (гибридные) установки для вакуумной обработки и нагрева, то есть установка ковш-печь в вакуумной камере (VAD – vacuum arc degasser). Данные установки предназначены для производства «чистой» и «сверхчистой стали».

Важный момент, который следует учитывать на агрегатах внепечной обработки стали – это обеспечение надлежащей модифицирующей обработки металла в сталеразливочном ковше и одновременное соблюдение продувки расплава инертным газом (параграф 3.2 главы 3), которая исключает поступление кислорода в расплав более 0,2 кг/т. Для этого необходимо в технологию и логистику работы сталеплавильного цеха заложить продолжительность всех этих операций как минимум 20 минут (рисунок 3.11) на установке ковш-печь и вакууматоре. Время между вводом алюминия и кальция в металл не менее 12 минут, и от ввода кальция и отключения продувки в ковше – не менее 8 минут.

Сравнение камерного и циркуляционного вакууматоров

Решение, какой тип вакууматора следует установить в данном сталеплавильном цехе, во многом определяется производимым сортаментом. Если требуется производить большое количество плавок с обезуглероживанием до очень низкого уровня, например, для производства сталей ULC или IF, то следует устанавливать циркуляционный вакууматор (RH) или его различные модификации с подачей кислорода в расплав (RH-OB, КТВ, TOP и др.). Например, содержание углерода 25 ppm (0,0025 мас. %) может быть легко получен в циркуляционном вакууматоре с подачей кислорода RH-OB (КТВ), тогда как в камерном вакууматоре с подачей кислорода (VOD) такое низкое содержание углерода не может быть достигнуто за аналогичный промежуток времени (потребуется на 10-15 минут больше). Нет большой разницы между циркуляционным и камерным вакууматором с точки зрения эффективности удаления водорода. Таким образом, если основной функцией вакууматора является удаление водорода, а иногда и азота, выбор системы будет определяться, в первую очередь, необходимой согласованностью работы сталеплавильного агрегата (конвертере или дуговая печь) и УНРС, а также с учётом капитальных и эксплуатационных затрат.

На основании литературного обзора и применяемой текущей практики на металлургических предприятиях составлена сравнительная таблица 5.2 двух различных типов вакууматоров.

Удаление серы в циркуляционном вакууматоре не представляется возможным из-за отсутствия взаимодействия шлака с металлом по сравнению с камерным вакууматором. Из-за конструкции RH-вакууматора, в процессе его эксплуатации существует недостаток – натекание атмосферного воздуха, что ухудшает процесс удаления азота по сравнению с камерным вакууматором, у которого наиболее меньше объём попадания воздуха в вакуум-камеру.

Таблица 5.2 – Сравнение камерного и циркуляционного вакууматоров по технологическим возможностям получения «чистой стали»

Параметр	Циркуляционный вакууматор (RH – recirculation degasser)	Камерный вакууматор (VD – tank degasser)
Схема вакууматора		
Удаление водорода [H]	От 6,0 до 1,0 ppm и ниже	От 6,0 до 1,0 ppm и ниже
Удаление азота [N]	От 0 до 20 % от начального значения	До 40-50 %* от начального значения
Удаление серы [S]	Не удаляется	До 50 % от начального значения при условии достаточной сульфидной ёмкости шлака
Удаление оксидных включений или снижение общего кислорода [O] _{общ}	Средняя эффективность при условии минимального натекания воздуха в вакуумную камеру	Высокая эффективность из-за активных условий всплытия включений в шлак и взаимодействия металл-шлак (площадь), ассимиляций включений шлаком и с одновременным минимальным поступлением кислорода в расплав извне

* при определенных требованиях к содержанию серы и кислорода

Из основных недостатков камерного вакууматора следует отметить его необходимость иметь большой свободный борт от верха ковша до шлака, с целью исключения выплеска шлака в начальный период набора вакуума. Данное расстояние должно быть не меньше 900 мм. Практика строительства и работы этих вакууматоров показала, что самые большие капитальные и эксплуатационные затра-

ты относятся к циркуляционным вакууматорам. Для получения «чистой стали» по кислороду, сере и азоту, за исключением углерода и достаточности свободного борта в ковше, выбор должен быть сделан в пользу именно камерного вакууматора.

Наиболее эффективные технологии получения «чистой стали» на участке внепечной обработки стали должны быть сосредоточены на контроле поступления кислорода из вне (воздуха, шлака, футеровки и отдающих материалов в ковш).

Предприятия, производящие «чистую сталь», раскисленную алюминием, не используют «кислые процессы». Применяемые огнеупоры для футеровки тепловых агрегатов не должны содержать ведущие кислые оксиды, например, кремнезём (SiO_2). Для улучшения процесса удаления фосфора и серы, сталеплавильный агрегат и сталеразливочный ковш должны состоять из основной футеровки (MgO , MgO-C , Mg-Cr и др.). Все эти условия обязательны для того, чтобы обеспечить процессы удаления фосфора как в сталеплавильном агрегате, так и серы в сталеразливочном ковше на агрегатах внепечной обработки стали.

Кроме набора оборудования, качества применяемых материалов и огнеупоров следует обратить внимание на важный параметр – логистический поток в сталеплавильном цехе. Он не должен быть разрозненным и хаотичным, а также технологическая цепочка от выплавки до разливки стали должна быть последовательная, с разделением технологии производства обычной и «чистой стали». Например, на японских заводах Aichi Steel производят «сверхчистую сталь» для деталей автомобилей TOYOTA [275] и Sumitomo Metal's (нынешнее Nippon Steel) в г. Вакаяме [276] «чистую сталь» для трубного производства нефтяного сортамента в нефтегазовой промышленности с высокими эксплуатационными свойствами.

На заводе Sumitomo Metal's обеспечивается содержание фосфора менее 0,01 мас. % за счёт внедрения специальных мер по набору оборудования получения «чистой стали» в конверторе и рафинированию стали от фосфора и удаления углерода из чугуна, упрощения последовательности, выполняемой технологии

на участках внепечной обработки стали по разделению потоков и выстроенной простой логистики в цехе. Это позволило сократить продолжительность времени внепечной обработки металла и времени нахождения расплава в ковше от выпуска с конвертера до начала разливки на УНРС. В итоге разграничение потоков и не смешивание сталеразливочных ковшей для «чистой стали» (низкая концентрация включений) и стали с функциональными свойствами (рассредоточенное и контролируемое содержания включений) было выполнено за счёт дифференцированного подхода к выбору набора и состава оборудования в сталеплавильном цехе (рисунок 5.3). До реализации этого проекта на заводе Sumitomo Metal's уже существовало традиционное производство, но было решено выполнить масштабный инвестиционный проект, с целью закупки требуемого набора сталеплавильного, внепечного и разливочного оборудования для возможности производить высококачественную «сверхчистую сталь» с низкой концентрацией включений.

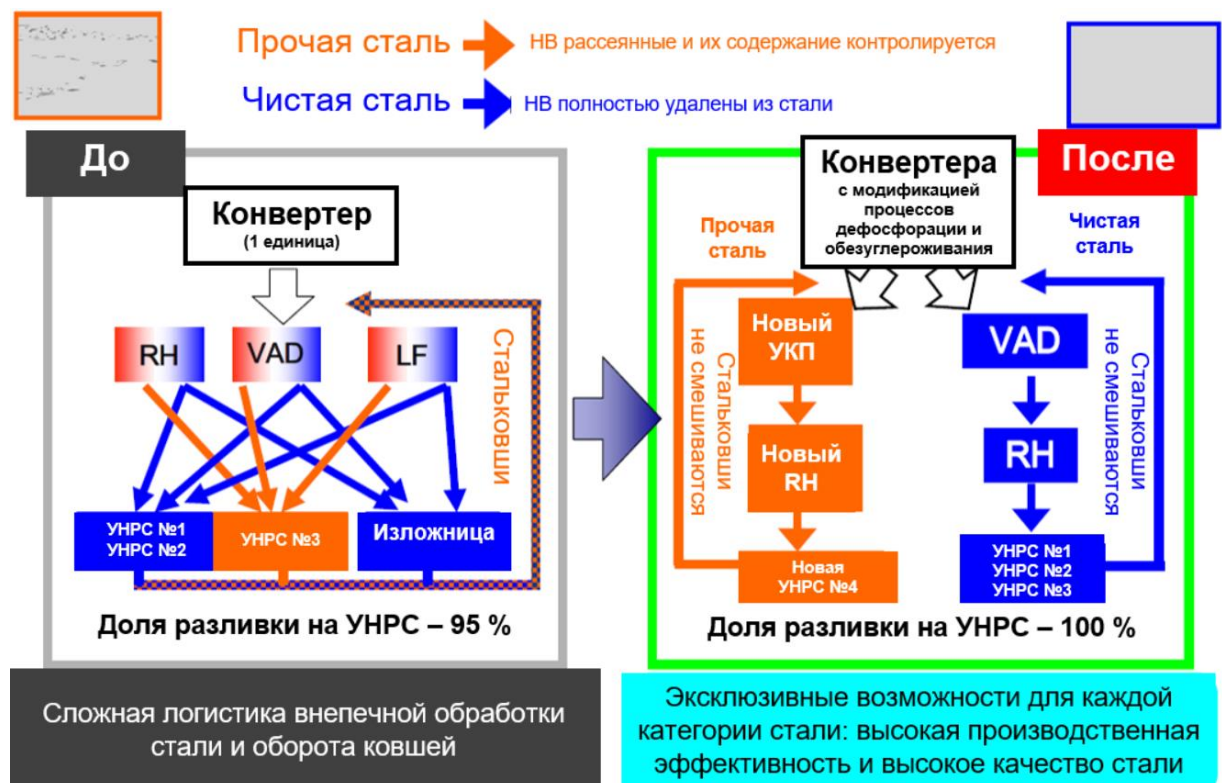


Рисунок 5.3 – Внедренные улучшения на заводе Sumitomo Metal's (Япония) в наборе сталеплавильного оборудования и разделение технологических процессов для «чистой» и прочих сталей (НВ – неметаллические включения; RH – циркуляционный вакууматор; VAD (vacuum arc degasser) – камерный вакууматор с возможностью дугового нагрева расплава; LF – установка ковш-печь или УКП)

Производство стали по улучшенной схеме позволяет производить в промышленных масштабах «чистую сталь» с разливкой на УНРС со следующими показателями: содержание серы менее 10 ppm (0,0010 мас. %), фосфора менее 50 ppm (0,0050 мас. %), кислорода менее 15 ppm (0,0015 мас. %) и не более 1,5 ppm (0,00015 мас. %) водорода.

Таким образом, для действующих цехов, в случае необходимости производить «чистую сталь», следует обращать 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 в будущей концепции совершенствования и развития сталеплавильного передела. В ином случае производить «чистую», высококачественную и конкурентоспособную сталь не представляется возможным.

Сталеплавильное оборудование должно обеспечивать гибкость технологического процесса и возможность применения нестандартных технологических воздействий. Исходя из требований к сортаменту готовой продукции, технологии, сталеплавильному и разливочному оборудованию следует разрабатывать простую последовательность операций и соответствующие параметры технологии производства «чистой стали». К таким параметрам относят: раскисление, легирование, шлакообразование, вакуумирование, продувка инертным газом, электродуговой нагрев расплава, контроль за поступлением кислорода, надежность работы системы сыпучих материалов и трайб-аппаратов для ввода проволок, места расположения пробок и ввода материалов в ковш, мониторинг и контроль технологического процесса с использованием современных цифровых камер, мониторинг за ходом ведения плавки и автоматические советчики для персонала цеха, надлежащий оборот сталеразливочных ковшей, исключение применения одних и тех же сталеразливочных ковшей для «чистой» и рядовой стали, быстро меняющаяся и адаптивная технология в случае изменения применяемых материалов.

Борьбу за чистую и надежную (вязкую) сталь проводят традиционно с помощью разных способов выплавки и внепечной обработки стали. Раскисление и вакуумирование снижают кислород в стали, а при последнем еще удаляется водород и азот. Шлаковый режим с достаточной сульфидной емкостью позволяет получать сталь с низким и ультранизким содержанием серы ($S \leq 0,0030$ мас. %). Фосфор удаляется металлургическими приемами лишь частично и при этом не достигается высокая степень очистки стали от него. Высокая чистота стали по фосфору получается при использовании высокочистой шихты, например, железа прямого восстановления ($P \leq 0,0060$ мас. %). Кроме этого, всё оборудование внепечной обработки стали и логистика работы цеха должны учитывать все технологические операции, которые следует выполнять по получению низкой концентрации неметаллических включений.

Автором диссертации разработан и представлен дифференцированный подход к требованиям технологии производства «чистой стали» и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства.

5.3 Оценка чистоты металла прямыми методами исследований

Кроме химического состава стали следует применять металлографические прямые методы исследования включений (оксидов и сульфидов), например, определяя объёмную долю, размер включений в микронах, характер распределения в металле и количество включений в мм^2 , химический состав и их морфология. Это позволяет понять их источник образования и их содержание в стали. Для этого следует анализировать специально подготовленные шлифы с применением оптической металлографии [251, 257].

Из одной многотонной плавки (~160 т) делается попытка отбора одной или нескольких проб металла весом около 100 грамм, из которых в зону исследователя металловеда попадает всего 1-2 грамма металла. Поэтому сделать адекватные выводы по содержанию неметаллических включений в стали или найти недостатки производства стали будет проблематично. Прямой контроль содержания вклю-

чений в стали – это дополнительный способ оценки качества стали, и он должен дополняться другими косвенным методом оценки чистоты стали, например, разливаемость стали на УНРС (позиция стопора и отложения включений на разливочном стакане), поверхностные и внутренние дефекты в металле, связанные с неметаллическими включениями, изменяющийся химический состав металла и шлака и др.

Шлифы оценивают баллом по худшему из полей зрения на нём, плавку – по среднему, худшему из этих баллов или по некоторому вычисленному из них «индексу включений». С позиции математической статистики некоторые из подобных оценок заведомо несостоятельны («чем больше просмотришь, тем хуже найдешь») [103].

Количественная металлографическая оценка загрязнённости стали неметаллическими включениями, с помощью автоматического анализа изображений

Разработана специальная методика (М.20-63.272.156) прямой оценки загрязнённости неметаллическими включениями стали, отобранной из сталеразливочного или промежуточного ковшей (размер пробы: диаметр 35 мм и толщина 12; вес пробы ~ 100 грамм). Данная методика устанавливает порядок отбора исследовательских проб металла и описывает процедуру металлографических измерений с определением объёмного содержания и размеров включений. Также возможно осуществлять оценку содержания включений в непрерывнолитом металле (в заготовке или слябе). Выполнялись металлографические измерения количества, линейных размеров, площади элементов микроструктуры выбранного сечения 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». К качеству пробы для контроля неметаллических включений предъявляются следующие требования: проба металла должна быть плотной, без трещин, раковин, видимых шлако-

вых включений; на поверхности пробы не допускаются заусенцы, плёны, пояса, наплывы. При наличии дефектов проба браковалась и повторно отбиралась.

Подготовка шлифов

Металлографический шлиф из пробы промежуточного или сталеразливочного ковшей изготавливают на расстоянии $2/3$ высоты пробы согласно требованиям ГОСТ 1778. Металлографический шлиф вырезается от проката в продольном направлении согласно ГОСТ 1778. Направление исследуемой поверхности на пробах, отобранных от сляба, зависит от целей исследования. Площадь поверхности образца должна обеспечивать изготовление шлифа площадью не менее 200 мм^2 . Плоскую поверхность подготавливают шлифованием и полированием до зеркального блеска в соответствии с методом ASTM E1245. Процесс приготовления шлифов обеспечивает высокое качество поверхности, необходимое для получения изображений, которые были обработаны анализатором изображения. На полированной поверхности не должно быть точечной коррозии, выкрашивания, грубых царапин толщиной более 1 мкм . Отполированная поверхность должна быть большей областью, требуемой для проведения измерений. Для оценки неметаллических включений травление шлифов не требовалось.

Металлографические измерения

Исследование проводят с применением металлографического микроскопа, оснащённого моторизованным предметным столом и аттестованного автоматического анализатора изображения. При работе с микроскопом использовали зелёный светофильтр для повышения контрастности изображения. Программное обеспечение анализатора изображения обладало следующими метрологическими характеристиками: относительная погрешность измерений объёмной доли включений при доверительной вероятности $P=0,95 \%$ не более 10% .

Выбранная площадь оценки плоскости шлифа была представительной для оценки включений и она составляла не менее 160 мм^2 , либо не менее 100 полей зрения при необходимом увеличении.

Анализ исследуемой плоскости проводился на сохранённом панорамном изображении, сформированном «склеиванием» смежных полей зрения в ходе

движения предметного столика или оценивалось каждое поле зрения в ходе движения предметного столика (от поля к полю).

С целью корректной идентификации неметаллических включений измерения проводились при увеличении большем, чем $\times 100$ и был принят размер пикселя 0,5-0,6 мкм.

Распознавание и выделение включений основывалось на разнице в уровне серого тона при их сравнении друг с другом и нетравленной матрицей. Установку порогов определения по уровню серого тона производили таким образом, чтобы распознавались все включения, в том числе мелкие, без увеличения размеров крупных включений. Для этого использовался автоматический анализатор изображений, с несколькими порогами дискриминации, для одновременного распознавания в одном поле зрения нескольких типов включений. Для точного распознавания включений использовался способ, состоящий в попеременном переключении между действительным изображением включений и распознанным. Измерения включений проводились в соответствии с требованиями ASTM E1245. С применением автоматического анализа изображений измерялся средний диаметр частиц и площадь всех распознанных включений на исследуемой площади. Объёмная доля включений была равна доле включений по площади и вычисляется делением суммы площадей всех распознанных включений на площадь панорамы. Результатами оценки загрязнённости неметаллическими включениями являлись: объёмная доля включений (%) и размер включений (мкм).

Также данной методикой можно было определить общую измеренную площадь (мм^2) и удельное количество включений (шт./мм^2). В зависимости от целей исследования, относительное содержание включений различного размера может приводиться в диапазонах по двум вариантам: вариант № 1 < 10 мкм, от 10 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм и >100 мкм или вариант № 2 (для сверхчистой стали) < 2 мкм, от 2 до 5 мкм, от 5 до 10 мкм и >10 мкм.

Содержание включений в промежуточном и сталеразливочном ковшах

Исследование проводилось на общем массиве из 37 плавок низкоуглеродистых ($C < 0,08$ мас. %), среднеуглеродистых ($0,14 \leq C \leq 0,25$ мас. %), коррозион-

нстойких и полуспокойных ($Si < 0,18$ мас. %) марок стали. Пробы металла для оценки неметаллических включений отбирались в сталеразливочном ковше перед передачей плавки на УНРС (после модифицирующей и очистительной обработки расплава) и во время разливки в середине плавки из промежуточного ковша (факты нестационарного режима разливки из-за перековшовки были исключены). В ходе исследования была изучена объёмная доля всех наблюдаемых неметаллических включений без учёта экстремальных значений – экзогенных включений, которые были связаны с отбором пробы и захвата шлака в пробу. Также было принято условие, что включения размером менее 2 мкм не учитываются, так как такой размер не влияет на конечное качество исследуемого металла. Второй вариант оценки включений размером менее 2 мкм следует применять для исследования «сверхчистой стали».

Подсчёт включений проводили на металлографическом микроскопе Axio Observer.D1m, оснащённом моторизованным предметным столом и автоматическим анализатором изображения Thixomet Pro. Объёмная доля включений рассчитывалась делением их суммарной площади на общую просмотренную площадь образца. Также рассчитывалось содержание в общей объёмной доле включений по варианту № 1 размерами от 2 до 10 мкм, от 10 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм и крупнее 100 мкм.

Химический состав включений определялся методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Ultra-55.

Объёмное содержание включений в пробах из сталеразливочного ковша на всем марочном исследуемом сортаменте находится в диапазоне от 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 0,021 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). Ранее в литературном обзоре было представлено, что для «чистой стали» объёмная доля включений

не должна превышать 0,02 об. % [19]. В нашем исследовании мы можем относить данную сталь к «чистой».

Увеличение неметаллических включений в промежуточном ковше УНРС было представлено в параграфе 3.3 главы 3 при рассмотрении вопроса оценки процесса вторичного окисления во время разливки. Такое возрастание загрязнения металла в промежуточном ковше можно объяснить реакциями вторичного окисления, эрозией футеровки, захватом шлака и др.

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) включений показал (рисунок 5.4), что в пробах из сталеразливочного ковша большинство включений являются сложными оксидами (алюминаты кальция и магния) с сульфидами кальция. В пробах из промежуточного ковша (рисунок 5.5) большинство включений содержат те же оксиды, но более крупных размеров и продукты реакций вторичного окисления, в состав которых входит марганец и кремний. В таблице 5.3 представлено распределение включений по размерам (вариант № 1) в сталеразливочном и промежуточном ковшах, отобранных от исследуемых плавов.

Исследовано было 37 плавов и 74 пробы металла. 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 количество включений размером более 50 мкм и выше, чем в сталеразливочном ковше (таблица 5.3). Также обнаружены включения продуктов реакций вторичного окисления металла шлаком, в которых присутствуют кремний и марганец (крупные включения размером от 50 до 100 мкм и более 100 мкм). В некоторых пробах металла из промежуточного ковша были обнаружены сульфиды кальция на поверхностях включений алюминатов (сульфидная оболочка). Это подтверждает проблему со вторичным окислением металла.

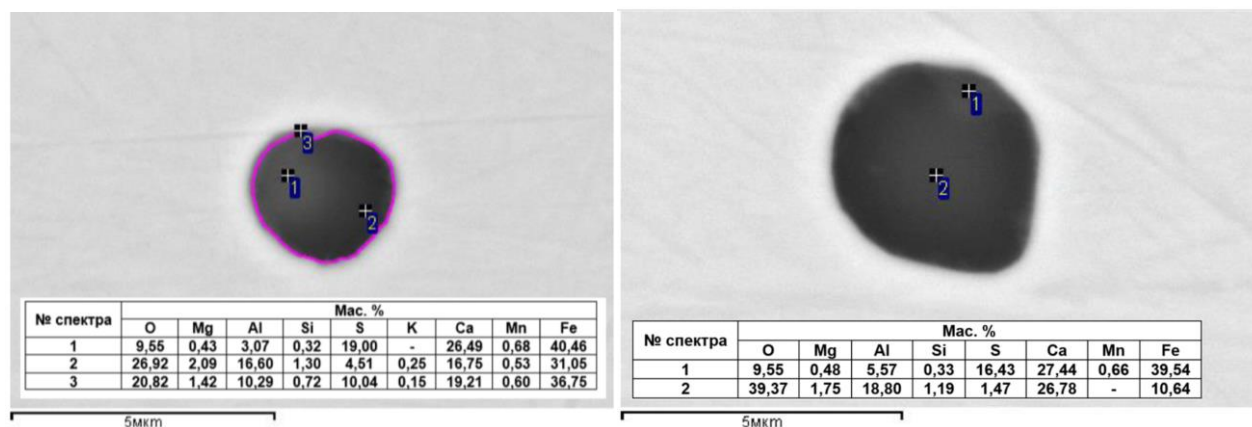


Рисунок 5.4 – Результат микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в пробах металла из сталеразливочного ковша для низкоуглеродистой стали

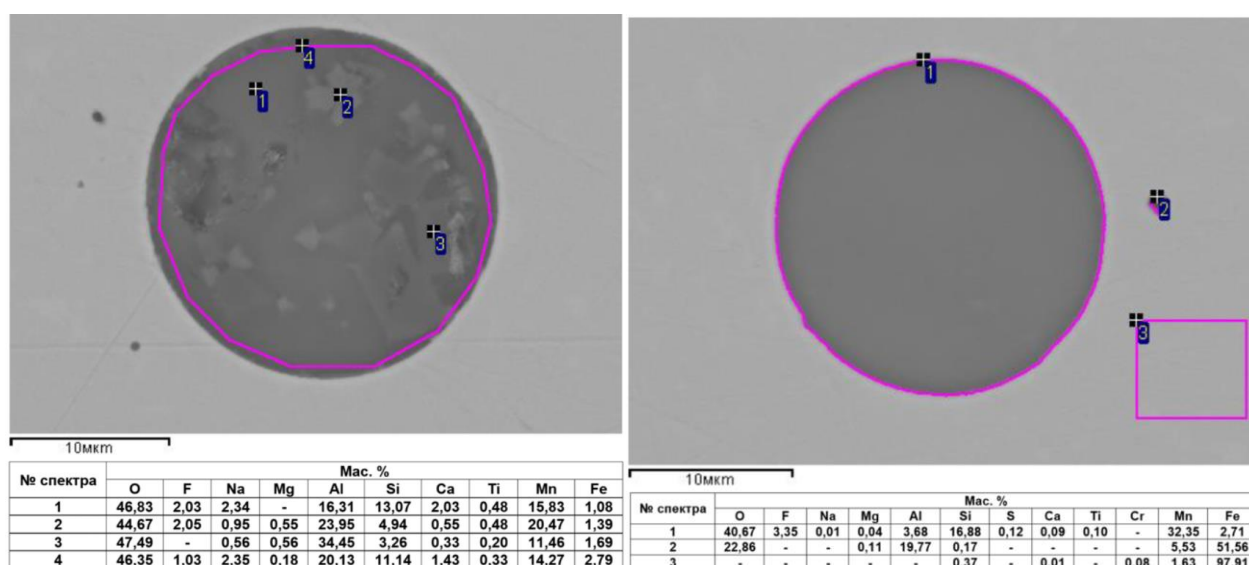


Рисунок 5.5 – Результат микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в пробе из промежуточного ковша для низкоуглеродистой стали

Таблица 5.3 – Размеры неметаллических включений в сталеразливочном и промежуточном ковшах

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

Данные из таблицы 5.3 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 сле-

дует обратить внимание для того, чтобы можно было оценивать текущую чистоту стали как в сталеразливочном, так и в промежуточном ковшах, и в случае проведения каких-либо работ (мероприятий) по снижению в металле включений оценивать получаемые результаты.

5.4 Разработка классификации высококачественных сталей по содержанию вредных примесей и газов

Содержание загрязняющих примесей при выражении их в процентах (по массе) невелико и поэтому не сигнализирует об опасности ухудшения качества стали. Влияние оказывает атомное содержание примесей, а не содержание элемента в процентах, которое выражается по массе (то есть определяется количеством нейтронов и протонов в ядре). Многие элементы, загрязняющие металл, имеют малую атомную массу [19, 37]. В литературном обзоре было отмечено, что удобно оценивать степень загрязнения стали в единицах, которые показывают число атомов примесей, приходящихся на 1 миллион атомов железа.

На китайском заводе Baosteel производят «чистую сталь» для трубопроводов и IF-сталь со следующими средними показателями [104]: общий кислород 24 ppm (лучший показатель 16-19 ppm), сера 16 ppm (лучший показатель – 9 ppm), азот 30 ppm (15 ppm) и фосфор 89 ppm (54 ppm). Для массового производства стали на данном заводе были внесены следующие ограничения для IF-сталь: $[O]_{\text{общ}} \leq 20 \text{ ppm}$, $[N] \leq 20 \text{ ppm}$; для трубной стали: $[O]_{\text{общ}} \leq 20 \text{ ppm}$, $[N] \leq 30 \text{ ppm}$; $[P] \leq 50 \text{ ppm}$; $[S] \leq 10 \text{ ppm}$; $[H] \leq 1,5 \text{ ppm}$.

Фактически достигаемое содержание нежелательных примесей составляет по данным автора [171]: фосфора 80-100 ppm, серы ~ 10 ppm, азота ~ 30 ppm, водорода 1-2 ppm. В производстве «чистой стали», в зависимости от области применения труб, подразумевается следующее: $[S] \leq 50$ или 10 ppm, $[P] \leq 150$ ppm или 100 ppm, $[H] \leq 1,5 \text{ ppm}$ и $[N] \leq 40 \text{ ppm}$. При этом упоминания по общему кислороду нет, а лишь присутствуют формулировки о низком содержании неметаллических включений.

Во всех случаях определенная классификация высококачественной стали по содержанию этих примесей и газов отсутствует.

Термин «чистая сталь» является неточным, поэтому некоторые авторы вводят различные формулировки по чистоте стали [269]. «Высокочистая сталь» – сталь с низким уровнем растворимых примесей. «Сталь с низким содержанием примесей» – примесей, которые возникают при переплавке металлошихты. «Чистая сталь» – сталь с низким уровнем дефектов, которые связаны с присутствием оксидных включений. В зависимости от области применения (машиностроение, энергетика, автомобилестроение и др.) чистые стали могут иметь разную степень чистоты.

В таблице 5.4 представлен обзор содержания в стали вредных примесей и газов с 1960 года по сегодняшнее время [19, 37, 100, 130, 132, 151, 197, 208, 242] и прогноз до 2050 г. по оценке автора диссертации. Кроме этого были учтены термодинамические ограничения получения низких концентраций этих элементов и будущая практика производства стали на металлургических заводах (учтено доступное качество будущих материалов для сталеплавильного производства и возможности цифрового контроля и мониторинга технологических операций). Прогресс повышения чистоты стали за последние 50 лет был определяющим для современной металлургии.

Ранее в публикации [74] был представлен прогноз получения стали, которая содержит следующее: $[O]_{\text{общ}} - 10 \text{ ppm}$, $[H] - 0,8 \text{ ppm}$, $[N] - 18 \text{ ppm}$, $[S] - 5 \text{ ppm}$, $[P] - 30 \text{ ppm}$, то есть производство так называемой «сверхчистой стали». В настоящее время существуют трудности получения данной стали в массовом производстве по содержанию кислорода, фосфора и азота. В мировой практике технология в сталеплавильном производстве уже достигла высоких показателей по чистоте стали и может обеспечивать потребителей металлопродукции, представленной чистоты (таблица 5.4).

Чистоту сталей предлагается описывать объёмной долей неметаллических включений и содержанием общего кислорода, водорода, азота, серы и фосфора.

Также чистоту стали следует рассматривать через максимальный размер неметаллических включений в стали, который следует ограничивать и контролировать.

За чистую сталь следует принимать сталь, в которой сумма всех загрязняющих примесей (S, P) и газов (O_{общ}, N, H) не превышает 1500 атомов на 1 млн. атомов железа. В настоящее время промышленные технологии позволяют производить сталь в разы чище, чем 50 лет назад и применение единственного термина «чистая сталь» считается не верным.

Таблица 5.4 – Хронология изменения вредных примесей и газов в «чистой стали» (ppm), а также прогноз будущего их содержания

Вредная примесь и газ	1960 г.	1985 г.	Настоящее время	Прогноз до 2050 г.
[O] _{общ}	30	15	5	5 - 10
	120	30	10	
	300	40	20	
[H]	6	3	< 1	< 1
		6	1 2	
[N]	100	20	10	< 30
	150	50 100	30 80	
[S]	300	50	< 10	< 10
		100 150	10 30	
[P]	300	100	50	< 70
		150 250	100	

В качестве практического положительного опыта, в настоящее время в ЛПК достигается значение суммы всех загрязнений, атомов на 1 млн. атомов железа менее 700, что уже можно отнести к классу «чистой стали» [228, 237]. Таким образом, в отечественной практике возможно производить «чистую сталь» в массовом производстве без применения средств специальной электрометаллургии (электрошлаковый, вакуумный дуговой и индукционный переплавы).

Если ранее содержание общего кислорода в «чистой стали» было 0,0020-0,0050 мас. %, то сейчас имеется техническая возможность производить

сталь с содержанием не более 0,0020 мас. %. По сере было 0,0300-0,0400 мас. %, то сейчас это менее 0,0100 мас. % и даже менее 0,0030-0,0050 мас. %. По фосфору – 0,0200-0,0300 мас. %, то сегодня это менее 0,0100 мас. %. По водороду было не более 0,0005-0,0006 мас. %, то сегодня не более 0,0002 мас. %. По азоту было до 0,0100-0,050 мас. %, сегодня не более 0,005 мас. %.

Исходя из этого следует ориентироваться на современные достигнутые показатели чистоты стали. Новая классификация чистоты стали – это «суперчистая сталь» (патент на изобретение №2740949 [272], Приложение Д) 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. [19]. В таблице 5.5 представлены ограничения по содержанию примесей, газов и объёмной доли включений в «суперчистой стали». Предлагается разделить высококачественную сталь по содержанию вредных примесей (концентрация общего кислорода, серы, водорода, азота, фосфора и объёмная доля включений) на две группы.

Таблица 5.5 – Содержание вредных примесей, газов и объёмной доли неметаллических включений для «суперчистой стали»

Содержание примесей и газов		«Суперчистая сталь»
[O] _{общ}	ppm	≤ 15
	мас. %	≤ 0,0015
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 50
[H]	ppm	≤ 1,5
	мас. %	≤ 0,00015
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 60
[N]	мас. %	≤ 0,005
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 160
[S]	мас. %	≤ 0,0015
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 20
[P]	мас. %	≤ 0,008
	атомов на 1 млн. атомов железа	~ 145
Сумма всех загрязнений, атомов на 1 млн. атомов железа		< 500
Объёмная доля неметаллических включений, об. %		≤ 0,015**

** Объёмная доля включений определяется согласно стандарта ASTM E1245. Объёмная доля включений равна доле включений по площади и вычисляется делением суммы площадей всех распознанных включений на площадь панорамы.

«**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:

$$[\text{O}]_{\text{общ}} \leq 50 \text{ ppm};$$

$$[\text{S}] \leq 250 \text{ ppm};$$

$$[\text{H}] \leq 6,0 \text{ ppm};$$

$$[\text{N}] \leq 100 \text{ ppm};$$

$$[\text{P}] \leq 250 \text{ ppm}.$$

«**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:

$$[\text{O}]_{\text{общ}} \leq 15 \text{ ppm};$$

$$[\text{S}] \leq 15 \text{ ppm};$$

$$[\text{H}] \leq 1,5 \text{ ppm};$$

$$[\text{N}] \leq 50 \text{ ppm};$$

$$[\text{P}] \leq 80 \text{ ppm}.$$

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

Следует также отметить, что показатель по содержанию общего кислорода менее 15 ppm (0,0015 мас. %) для стали, раскисленной алюминием, в отечественной практике труднодостижим, а если и достигим, то невозпроизводим в массовом производстве стали. О причинах не достижения низкого содержания общего кислорода было описано в параграфе 1.4 главы 1.

«Суперчистую сталь» возможно получить путём раскисления её алюминием. Производство «суперчистой стали» также подразумевает определенный набор оборудования и качество применяемых материалов (химический состав), которые могут обеспечивать 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.

Выводы по главе 5

1. Производство «чистой стали» следует осуществлять с помощью современных способов выплавки и внепечной обработки, разливки стали на УНРС. Раскисление и вакуумирование снижают кислород в стали, а при последнем еще удаляется водород и азот. Шлаковый режим с достаточной сульфидной ёмкостью позволяет получать сталь с низким и ультранизким содержанием серы ($S \leq 0,0030$ мас. %). Фосфор удаляется металлургическими приемами лишь частично и при этом не достигается высокая степень очистки стали от него. Высокая чистота стали по фосфору получается при использовании высокочистой шихты, например, железа прямого восстановления ($P \leq 0,0060$ мас. %).

2. Разработан и представлен дифференцированный подход к требованиям технологии производства «чистой стали» и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства. Сталеплавильное оборудование должно обеспечивать гибкость технологического процесса и возможность применения нестандартных технологических воздействий. Исходя из требований к сортаменту готовой продукции, технологии, сталеплавильному и разливочному оборудованию следует разрабатывать простую последовательность операций и соответствующие параметры технологии производства «чистой стали».

3. Разработана и предложена металлографическая методика оценки включений в сталеразливочном и промежуточном ковшах для осуществления сравнительной оценки таких показателей как объёмная доля и размер включений.

5. Было представлено, что в настоящее время в отечественной практике уже возможно производить «чистую сталь» в массовом производстве без применения средств специальной электрометаллургии.

6. Разработана классификация чистоты стали по содержанию в ней общего кислорода, серы, фосфора, азота, водорода и объёмной доли включений с разделением на «чистую сталь» и «суперчистую сталь». Введенное новое понятие «суперчистая сталь» было запатентовано автором диссертации. Данная классификация позволяет дифференцированно 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.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОРРЕКТИРОВКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА «ЧИСТОЙ СТАЛИ»

6.1 Производственные потери из-за неметаллических включений

Существует востребованность разработки и внедрения алгоритма корректировки технологии производства стали, связанной со снижением содержания в металле неметаллических включений с учётом негативных элементов производства «чистой стали». Как ранее рассматривали в диссертации к ним можно отнести: неуправляемые процессы вторичного окисления металла во время разливки, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, ухудшение технологических свойств работы шлака в кристаллизаторе УНРС и ограничение серийности разливки на УНРС.

Несмотря на то, что современное сталеплавильное производство обеспечивает высокий выход годного металла, разливаемого на УНРС (от 90 до 99,5 % зависит от марочного сортамента и разливаемого профиля), время от времени могут возникать существенные производственные потери из-за неметаллических включений, связанных со снижением выхода годной продукции: брак металла из-за неметаллических включений; поверхностные и внутренние дефекты в непрерывнолитом металле; отрицательное влияние неметаллических включений на механические свойства (временное сопротивление разрыву δ_b и предел текучести δ_T в Н/мм² и др.) и другие служебные характеристики металла; ухудшение разливаемости стали на УНРС до возможного образования прорывов кристаллизующейся корочки металла. Ранее в диссертации были рассмотрены примеры этих негативных влияний, которые на прямую отражаются на производительности сталеплавильного цеха, на себестоимости стали и таким образом ухудшают технико-экономические показатели предприятия.

В связи с этим была сформулирована задача по разработке и внедрению алгоритма корректировки технологии производства стали, связанной со снижением содержания в металле включений с учётом негативных элементов производства

«чистой стали» (вторичное окисление металла во время разливки, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, ухудшение технологических свойств работы шлака в кристаллизаторе УНРС).

6.2 Создание нового метода мониторинга и контроля производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве

Прежде всего требуется создать систему автоматизированного мониторинга и контроля технологии производства высококачественной стали на базе средств и систем автоматизированного управления технологического процесса, уже имеющегося в цехе или вводя в эксплуатацию совершенно новую. Целью данной системы является управление технологией и качеством производимого металла за счёт автоматизированного контроля параметров технологии выплавки, внепечной обработки, непрерывной разливки стали, определяющих качество непрерывнолитого металла и его стабильности. Кроме этого, следует повышать оперативность контроля технологии и качества продукции за счёт перехода с пассивного (контроль качества готовой продукции) на активный метод: контроль соблюдения технологии производства (специальный перечень параметров), исключение, минимизация количества продукции, производимой с отклонениями от заданной технологии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Ввести в эксплуатацию систему автоматизированного контроля технологии выплавки, внепечной обработки, непрерывной разливки стали.
2. Стандартизировать технологию производства «чистой стали»: выпуск плавки, внепечной обработки стали (УКП и вакууматор) и непрерывная разливка стали (применяемые материалы и защита от вторичного окисления).
3. Внедрить в работу автоматический анализ возможных причин отклонения технологии по всем агрегатам в сталеплавильном цехе.
4. Объединить всю технологическую цепочку от выплавки стали до кристаллизатора УНРС и рассматривать всё это как единое целое. Для этого необхо-

димо интегрировать разрозненные данные в эту систему. Например, данные по сбору и оцифровки факта отклонений на выпуске плавки, по огнеупорам сталеразливочного ковша, данные, которые собираются локально не базовой системой автоматизации цеха, замечания по работе ШОС в кристаллизаторе УНРС и др.

5. Отчёты по анализу причин отклонений должны быть доступны на уровне персонала цеха по итогам работы смены в сравнении с другими сменами и отклонениями от целевых показателей. Также следует внедрять в работу автоматические алгоритмы расследования нештатных ситуаций в сталеплавильном цехе, связанных с технологией и качеством продукции (примеры расследования причин отклонений приведены в главе 3).

Текущая ситуация на исследуемых металлургических предприятиях

На рассматриваемых металлургических предприятиях осуществляется несистематизированный мониторинг и контроль технологии от подготовки металлошихты до отгрузки непрерывнолитого металла. В недостаточно в полной мере реализованы модули контроля соблюдения технологии за счёт использования штатной автоматизации цеха и отдельно работающих систем контроля качества, а также ведения записей в локальных в таблицах excel и в том числе в бумажном варианте. Многие информационные системы не в полной мере поддерживаются в надлежащем состоянии для последующего их анализа. Это ограничивает в оперативном принятии адекватных решений по корректировке технологий.

Технологи цехов часто используют внутренние системы сбора технологических данных и оперативную веб-аналитику со всех агрегатов для поиска отклонений в технологии. Данные системы используются в «пост» режиме с задержкой по времени, то есть продукция уже произведена. Также активно используются различные системы соблюдения ключевых технологических параметров (стандартные системы автоматизации от основного оборудования или оперативная веб-аналитика). В некоторых случаях эти системы не настроены на необходимый сбор и обработку технологических параметров.

При этом у технологов в цехе отсутствует единый и полный инструмент оперативного мониторинга за отклонениями в технологии, которые могут приводить к дефектам сталеплавильного производства. При использовании пользователем всего доступного инструментария в разрезе всей технологической цепочки приводит к тому, что затрачиваются значительное время и силы по сбору и обработке данных по производимым слябам, заготовкам, плавкам или сериям плавок. Другим словами, для проведения сквозного мониторинга требуется значительный инженерный штат сотрудников на предприятиях. Эту функцию необходимо консолидировать в одно лицо или единый центр ответственности для принятия окончательных решений в разрезе баланса: «качество-себестоимость-производительность».

При возникновении отклонений технологии или технологического параметра в цехе необходимо оповестить сменный персонал. К концу смены старший рабочий должен владеть всей информацией о работе, включая отклонения. Далее эту информацию следует оперативно (сразу) расследовать дневным персоналом предприятия для выявления первопричин отклонений (нарушений). В данном случае можно выходить на новые уровни как развития технологии, так и минимизации отклонений, связанных с работой оборудования, качества применяемых материалов и рабочего персонала, который является исполнителем разработанной (действующей) технологии. В таком варианте будут исключены возможные неверные технологические и организационные вопросы производства высококачественной металлопродукции.

Требования к системе автоматизированного контроля технологии

Программа должна быть универсальной и оптимальной для применения специалистами и экспертами в металлургии, а не для математиков и «дата-аналитиков». Программа также должна иметь возможность масштабироваться. Например, при появлении новых систем возможна интеграция в систему оперативного контроля параметров. Следует предусмотреть создание единых/универсальных условий по подключению агрегированных (подготовленных и вычищенных) данных.

Как было рассмотрено в главе 2, несмотря на высокую автоматизацию всех процессов и полной автоматизации сталеплавильных агрегатов, следует начать внедрять в работу надежные и адаптированные модели, способные предсказать конечный результат плавки и качество металлопродукции. Для получения успеха работы АСУ ТП в цехе следует рассматривать одновременное применение статической и динамической модели (термодинамический подход). Такой новый комбинированный подход совершенствования технологии производства стали, в том числе с применением и внедрением методов углубленной аналитики и машинного обучения, позволит быстрее выявлять первопричины проблем и наиболее релевантные технологические параметры.

Ожидаемая эффективность системы автоматизированного контроля технологии

Использование большого массива исходных данных и переход с рутинного ручного анализа технологических данных в непринужденную обработку в течение нескольких секунд. Для всех специалистов будет представлена единая информация. В таком случае эффективно разбирать нештатные ситуации или отклонения в технологии. Возможно реализовать функцию обучения персонала в сталеплавильном цехе. Будет обеспечена единообразная работа всех смен и повышение качества, а также стабильности выпускаемой металлопродукции. В том числе, будет обеспечен поиск узких мест в действующей технологии и используемых материалов.

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 (следить) в режиме реального времени. В случае каких-либо отклонений осуществлять соответствующие воздействие и корректировку на технологию. Например, в случае индикаций увеличения прироста фосфора в сталеразливочном ковше или высокой концентрации оксидов железа и марганца в ковшевом шлаке, следует осуществить оперативную коррекцию по недопущению повторного попадания шлака в будущем. Для этого осуществля-

ется поиск первопричин с последующей разработкой корректирующих мероприятий различной направленности (оборудование, технология, персонал, применяемые материалы и др.). Другой пример, выполняемый мониторинг за технологическими параметрами разливки металла на УНРС по параметрам позиции стопора и колебаниям уровня металла можно косвенно судить о чистоте стали по тугоплавким неметаллическим включениям. В таком случае коррекция и совершенствование технологии могут быть осуществлены по двум направлениям: технология внепечной подготовки стали для разливки на УНРС и снижения негативных процессов вторичного окисления металла во время перелива расплава из сталеразливочного в промежуточный ковш. Таких примеров можно привести множество.

В некоторых случаях следует инициировать не только организационные, но и инвестиционные проекты. Для этого необходимо готовить экономические расчёты текущих потерь (фактическое состояние) и будущую прибыль в случае снижения потерь из-за качества и производительности оборудования. Решающим в этом деле является как снижение себестоимости стали, так и получаемый эффект, которые в комплексе могут быть определяющими в принятии положительного решения запуска инвестиционного проекта на металлургическом предприятии для получения в будущем лучшие технико-экономические показатели.

Уточненный перечень контролируемых параметров технологии производства «суперчистой стали»

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 (таблица Е.1 в Приложении Е), которые влияют на качество, производительность и себестоимость стали. Эти ключевые параметры охватывают следующие важные технологические блоки производства «чистой стали» от выплавки до разливки:

- раскисление полупродукта на выпуске плавки;
- шлакообразование 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.

Представленный перечень не исчерпывающий и при определенных производственных условиях может быть дополнен и скорректирован. Например, в параграфе 3.3 главы 3 был представлен пример оперативной оценки защиты металла от вторичного окисления на УНРС, где было рекомендовано во время разливки металла осуществлять контроль за поверхностными дефектами (поперечные трещины или «плена по следу качания») и обращать внимание на «прилипание» корочки слитка к кристаллизатору, так как причины данных отклонений можно связать с негативными процессами вторичного окисления металла. Кроме этого, во время разливки «чистой стали» на УНРС следует в режиме онлайн контролировать индикаторы процесса вторичного окисления по таким показателям как прирост азота в металле, изменение содержания химических элементов в стали (Al, Si, Mn) и в промежуточном ковше, связанного алюминия ($Al_{окс}$).

В качестве практического применения данного мониторинга и контроля параметров производства можно привести разобранные примеры, представленные в главе 3. Первый пример, это расследование причин образования «раскатанной поперечной трещины по следу качания» на среднеуглеродистых марках стали и других поверхностных дефектов (параграф 3.3). Осуществление факторного анализа в сталеплавильном цехе по сокращению времени на выявление и поиск отклонений технологии в 2-5 раз по сравнению с ручным сбором данных. Второй пример, это расследование причин колебаний уровня металла в кристаллизаторе и прорывов на УНРС (параграф 3.6). Третий пример – решение задачи по мини-

мизации включений на основе MgO через непрерывный мониторинг за технологическими параметрами работы сталеразливочных ковшей (параграф 3.4).

Остановимся на третьем примере, где в рамках сталеразливочного ковша были выявлены следующие значимые технологические аспекты (рисунок 6.1):

1. Влияние истории работы ковша: ввод в работу после ремонта футеровки или длительного нахождения ковша под горелкой без металла. На данных ковшах отмечалось повышенное содержание оксидных включений в готовой металлопродукции.

2. Время нахождения металла в сталеразливочном ковше (от выпуска плавки до начала разливки) должно минимизироваться (чем меньше, тем лучше для чистоты металла по включениям).

3. Контроль и управление химическим составом ковшевого шлака и сужение границы по концентрации MgO. Шлак в ковше не должен быть сверх жидким и сверх вязким (густым).

4. Контроль за состоянием огнеупоров сталеразливочного ковша (формирование шлакового гарнисажа на футеровке ковша и его своевременная очистка, недопущение локального износа шлакового пояса, контроль температуры футеровки сталеразливочного ковша перед выпуском плавки из сталеплавильного агрегата, остаточная толщина огнеупоров и др.).

5. Контроль за работой продувочных фурм (при неудовлетворительной продувки выявлялись причины этих отклонений, которые оперативно устранялись).

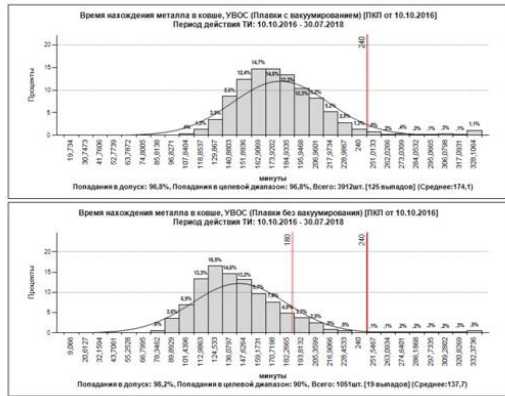
Таким образом, внедренный улучшенный мониторинг и контроль за сталеразливочными ковшами выдвинул на совершенно новый уровень организацию производства «чистой стали» с учётом фактического обслуживания и оборота ковшей. В итоге это привело к следующим результатам: процент открытия шибера сталеразливочного ковша без кислорода увеличился с 97 до 99,5 %, стабилизация химического состава шлака по содержанию MgO (с 4-12 до 4,5-8,5 мас. %) и снижению доли дефектов, связанных с оксидом магния в готовом металлопрокате.

Номер оборота ковша после ремонта футеровки или отстоя ковша более 5 часов без металла

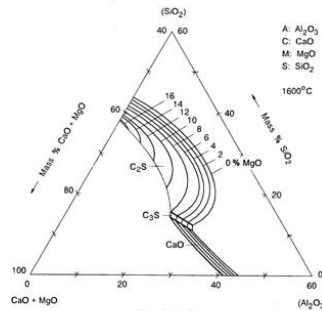
№1 №2 №3 №4



Время нахождения металла в ковше не более 240 мин (цель не более 180 мин)



Оптимум по концентрации в шлаке MgO и CaO с целью исключения получения сверх вязкого или сверх жидкого шлака



Контроль за состоянием огнеупоров сталеразливочного ковша



Контроль за работой продувочным фурм



Рисунок 6.1 – Выявленные технологические аспекты по снижению неметаллических включений на основе оксида магния (MgO) в сталеразливочном ковше, путём внедренного улучшенного мониторинга и контроля производства «чистой стали»

Мониторинг и контроль указанных параметров в таблице Е.1 (Приложение Е) осуществляет выдвижение организации производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве на совершенно новый уровень.

Таким образом, с учётом установленных технологических блоков производства «чистой стали» от выплавки до разливки, с внедрением мониторинга и контроля ключевых технологических параметров, позволяют поднять общий уровень технологии до показателей лучших мировых практик за счёт оптимального пути совершенствования технологии. В итоге на практике возможно осуществлять корректировку технологии производства стали, связанной со снижением содержания в металле неметаллических включений на всей технологической цепочке (исключается точечная и не эффективная корректировка), а также учитывать и обосновывать дополнительные мероприятия, которые могут исключить нежелательные элементы производства «чистой стали» (вторичное окисление металла, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш и ухудшение технологиче-

ских свойств работы шлака в кристаллизаторе УНРС), на которые ранее не обращали внимание или не были включены в комплекс решаемых задач.

6.3 Комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали с низким содержанием неметаллических включений

Следует отметить, что в главе 3 была представлена практическая польза от применения комплексного подхода разработки технологии подготовки «чистой стали» к разливке на УНРС, что позволило снизить содержание в металле тугоплавких неметаллических включений и повлияло на стабилизацию разливки металла на УНРС. Также в главе 3 было отмечено, что одновременная реализация мероприятий по раскислению, шлакообразованию, продувки расплава аргоном и модифицированию неметаллических включений кальцием приводит к снижению удельного расхода огнеупорных материалов для сталеразливочных ковшей, снижению удельного числа прорывов на УНРС, уменьшению средней объемной доли включений и дефектов в трубе, связанных с включениями (плена и пузырь-вздутие).

В литературном обзоре главы 1 было рассмотрено, что пути совершенствования технологии производства «чистой стали», связанной со снижением в металле включений на металлургических предприятиях, имеют различные направления и мероприятия. При этом мероприятия для промежуточного ковша и кристаллизатора УНРС считаются малоэффективными и на них не обращают внимания, а также не развивают на необходимом уровне. При создании универсального подхода к масштабируемости технологии «чистая сталь» это было учтено.

Комплекс технологических мероприятий производства «чистой стали»

Рассматривая одну из традиционных технологических цепочек производства «чистой стали» (например, ДСП (или конвертер) → У КП → ВД → УНРС), важно обратить внимание на обеспечение стабильности температуры металла в промежуточном ковше УНРС (должна быть не низкой и не высокой). В главе 2

был представлен один из инструментов прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах с применением прогнозной аналитики, который также следует применять и внедрять в сталеплавильном цехе.

Комплекс базовых мероприятий на внепечной обработке стали

В результате выполненной работы был сформулирован следующий комплекс базовых мероприятий для внепечной обработки высококачественной стали.

1. Первичное раскисление должно проводиться с минимально необходимым количеством алюминия.

2. Перед началом обработки на ковше-печи (УКП) содержание алюминия не должно превышать 0,0550 мас. %.

3. Начальная температура расплава в сталеразливочном ковше перед внепечной обработкой стали должна быть не ниже 1550 °С.

4. Раскисление алюминием во время выпуска плавки из сталеплавильного агрегата должно выполняться с использованием слитков алюминия или гранул (дробь).

5. Раскисление шлака в ковше на установке ковш-печь должно выполняться с использованием алюминиевых гранул (дробь).

6. Точная регулировка содержания алюминия в металле на УКП или вакууматоре должна выполняться с помощью алюминиевой катанки (проволоки).

7. Для лучшего раскисления, десульфурации и чистоты стали, содержание оксида железа и марганца в шлаке должно быть снижено до значений не более 1,0 мас. %.

8. Химический состав шлака в сталеразливочном ковше должен быть отрегулирован так, чтобы соответствовал согласно пункту 3 таблицы Е.1 (Приложение Е). Агрегатное состояние шлака должно оставаться жидким в течение всего времени обработки в ковше, поэтому следует избегать длительных пауз без электродугового нагрева на УКП.

9. Процесс раскисления шлака должен регулярно проверяться путём визуального контроля цвета шлака или при наличии быстрого онлайн анализа состава шлака каждые 10 минут. Раскисленный (восстановленный) шлак имеет белый цвет или с оттенками зелёного.

10. Для достижения чистоты стали по неметаллическим включениям требуется выдерживать время очистительных и усредняющих продувок расплава аргоном в течение ~20 минут (не меньше 12 минут) после последней добавки алюминия и перед началом обработки кальцием (рисунок 3.11).

11. Скорость нагрева или остывания расплава в сталеразливочном ковше должна быть отрегулирована так, чтобы температура жидкой стали была на 8-10 °С выше температуры, с которой ковш будет отправлен на УНРС перед началом модифицирующей обработки металла кальцием.

12. После достижения содержания серы в расплаве менее 0,0100 мас. % следует интенсивность продувки расплава снижать до уровней, чтобы поступление кислорода из воздуха было менее 0,2 кг/т.

13. По завершению обработки плавки следует скорректировать содержание алюминия до уровня 0,0280-0,0450 мас. % или значений, которые будут гарантировать получение алюминия требованиям заказа в промежуточном ковше УНРС.

15. Модифицирование кальцием осуществляется согласно представленной схеме на рисунке 3.11. Модифицирующая обработка кальцием должна осуществляться при содержании в металле, связанного алюминия ($Al_{окс}$) менее 0,0020 мас. % и серы менее 0,0030 мас. %. Это достигается путём мягкой продувки без оголения зеркала металла в течение 15-25 минут. После ввода кальция должно быть исключено включение дугового нагрева или сильная продувка расплава инертным газом с оголением зеркала расплава.

Контроль технологического процесса производства «чистой стали»

Для управления внепечной обработкой стали в сталеразливочном ковше требуется следующая информация:

- планируемое время прибытия сталеразливочного ковша на УНРС;

- требуемая температура жидкой стали в конце внепечной обработки или перед подъёмом сталеразливочного ковша на УНРС;
- химический состав стали по всем ключевым химическим элементам и их допуски (максимум и минимум);
- фактический химический анализ всех отдающих материалов в металл и на шлак (ферросплавы, раскислители, проволоки, шлакообразующие и флюсы);
- тепловое состояние футеровки и стойкости элементов огнеупоров сталеразливочного ковша;
- данные по выпуску плавки: содержание растворенного кислорода в полупродукте и температура перед самым выпуском, технология предварительного раскисления, легирования и шлакообразования (вес и время ввода соответствующих материалов в ковш), количество попадающего сталеплавильного шлака, химический анализ сталеплавильного шлака и шлака в сталеразливочном ковше после выпуска.

Ключевым контролем выпуска плавки является содержание растворенного кислорода, углерода в расплаве и температура металла.

Наличие этих технологических данных позволяют производить высококачественную сталь с низким содержанием неметаллических включений.

Контроль за продувкой расплава в сталеразливочном ковше

Контроль за продувкой расплава в сталеразливочном ковше является одним из ключевых элементов производства «чистой стали». По продувке расплава инертным газом были отмечены следующие важные пункты.

1. Продувку расплава в сталеразливочном ковше следует начинать одновременно с началом выпуска стали. Во время выпуска, а также через ~ 3 минуты после выпуска требуется сильная интенсивность продувки с диаметром пятна продувки ~ 500 мм.

2. В начале внепечной обработки стали на УКП шлак должен быть разжижен за счёт сильной продувки расплава (таблица 3.5). Диаметр продувочного пятна более 400 мм.

3. В период раскисления шлака и десульфурации металла следует осуществлять продувку со средней интенсивностью. Диаметр продувочного пятна около 150-300 мм (таблица 3.5).

4. После добавления алюминия и после обработки расплава кальцием, интенсивность продувки расплава должна быть снижена до исключения визуального пятна продувки с оголёнными участками зеркала металла. Необходимо исключить прямой контакт между поверхностью жидкой стали (через пятно продувки) и атмосферой воздуха.

5. Пятна продувки не должны быть визуально видны для очистительного периода перед отправкой ковша на УНРС. Отключение продувки должно выполняться после ввода кальция через 8 минут или более (зависит от ёмкости ковша).

Промежуточный ковш и кристаллизатор УНРС

С целью получения низкого содержания общего кислорода ($\leq 0,0018$ мас. %) в промежуточном ковше и исключения поступления кислорода из воздуха, необходимо обеспечить снижение концентрации SiO_2 в шлаке. Термодинамические расчёты подтвердили, что при высоких концентрациях SiO_2 в шлаке (> 60 мас. %) возможен активный процесс окисления металла, который может привести к ухудшению работы шлаковой смеси (шлака) в кристаллизаторе с образованием грубых поверхностных дефектов поперечного вида, вплоть до возникновения прорыва на УНРС. Главные мероприятия по исключению и минимизации вторичного окисления металла, раскисленного алюминием, должны быть направлены на снижение процессов подсосов воздуха в металл, переход на работу ШОС для промежуточного ковша с пониженным содержанием SiO_2 и минимизацию турбулентного перемешивания металл/шлак в промежуточном ковше. Также следует применять рабочую футеровку для промежуточного ковша с низким содержанием кислых оксидов (SiO_2 и Fe_2O_3) и при этом не допускается содержание оливинов $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ (см. параграф 3.3 в главе 3).

В главе 4 были установлены дополнительные значимые технологические параметры производства «чистой стали», которые могут значительно менять содержание в металле неметаллических включений и качество металла – это вяз-

кость и основность ШОС для кристаллизатора УНРС. Необходимо рассматривать как отдельное влияние водорода и оксидов в металле, так и их совместное комплексное влияние на изменение параметров теплопередачи через шлак в кристаллизаторе. В целях исключения влияния водорода и чистоты стали по оксидам, рекомендуется осуществлять вакуумирование металла (водород $\leq 0,00020$ мас. %) и поддерживать в металле содержание включений (общий кислород $\leq 0,0020$ мас. %) на уровне, не превышающим существенное воздействие на физико-химические свойства шлака в кристаллизаторе. В случае повышенного содержания в металле как водорода, так и общего кислорода, получить стабильные и воспроизводимые свойства шлака в кристаллизаторе не представляется возможным. В параграфе 4.4 главы 4 представлен алгоритм подбора шлакообразующей смеси кристаллизатора для разливки «чистой стали» на УНРС.

Представленный комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали, с низким содержанием неметаллических включений, является не исчерпывающим для применения его в других производственных условиях. Поэтому следует, исходя из текущих условий производства и действующей технологии, проводить аудит и определять значимые и эффективные мероприятия для последующей корректировки технологии производства с учётом повышенных требований к нему.

6.4 Разработка и внедрение алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству

В литературном обзоре было показано, что отсутствует общая концепция производства «чистой стали» с учётом всех происходящих процессов в единой технологической цепочке: «выплавка – выпуск плавки – внепечная обработка – разливка стали». Такое положение на практике приводит к ошибочному принятию решений по совершенствованию и корректировке технологии без учёта качества металлопродукции.

На некоторых предприятиях отсутствует исходное понимание, где сейчас находится технология и какой её уровень, что не даёт уверенных шагов в сторону реализации необходимых мероприятий, связанных со снижением включений в стали. Часто не анализируются первопричины отклонений, не выявляются на должном уровне «узкие места» и действующие ограничения, которые следует устранять и исключать. Также на практике производительность цеха преобладает над качественными показателями металлопродукции. Одновременно не прорабатываются в полной мере главные и второстепенные мероприятия.

Следует также учесть различные взгляды исследователей на процессы раскисления и вакуумной обработки стали, несмотря на то, что данные вопросы в мировой металлургии уже были решены и исследованы. Как ключевой момент можно отнести важность организации и логистики производства в сталеплавильном цехе на всех переделах, с принятием решений одним лицом с целью поиска адекватного баланса и оптимума по таким показателям как себестоимость, производительность и качество непрерывнолитого металла или готовой металлопродукции. В данном случае, как показала практика, освоение и внедрение технологии производства «чистой стали» может привести к успеху с оптимальными результатами повышения чистоты стали по включениям, с одновременным обеспечением высокой производительности и низкой себестоимости стали.

Следует также рассмотреть негативные элементы производства «чистой стали», к которым можно отнести: усиление вторичного окисления, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, изменяющиеся физико-химические свойства шлаков в промежуточном ковше и в кристаллизаторе УНРС на протяжении серии плавов. Как пример, может возникнуть пересекающаяся проблема на слябовых УНРС – это образования продольных и поперечных трещин, плён, захват шлака в корочку слитка из-за нестабильности работы ШОС в кристаллизаторе из-за включений в стали.

Исходя из диссертационной работы был исследован сложный комплекс мероприятий, который позволяет снизить общее содержание в металле неметаллических включений, вредных примесей и газов. Далее следует решить задачу

по разработке и внедрению алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству. Также необходимо учесть установленные негативные элементы производства «чистой стали», которые были описаны выше.

Прежде всего, необходимо осуществить аудит текущего состояния технологии по следующим элементам: выплавка и выпуск жидкого полупродукта в сталеразливочный ковш (ввода материалов на выпуске), внепечная обработка металла в сталеразливочном ковше и вакуумирование (продувка, шлакообразование, ввод алюминия и кальция в расплав), процесс перелива металла из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш, металлургия шлака в промежуточном ковше, работа шлака в кристаллизаторе УНРС. Дополнительно следует установить и выявить текущие проблемы по качеству металла, связанных с содержанием в стали неметаллических включений: брак металла из-за неметаллических включений (прямая и косвенная оценка качества металла по оксидам и сульфидам); поверхностные и внутренние дефекты; разливаемость на УНРС, удельное число прорывов на УНРС (шт./т) и др. Также требуется учесть уровень содержания в стали общего кислорода как в промежуточном, так и в сталеразливочном ковшах, а в случае отсутствия такого контроля необходимо осуществить организацию его внедрения на постоянную основу. Следует собрать и изучить данные по металлографическим исследованиям природы образования дефектов из-за неметаллических включений (важен источник неметаллических включений: шлак, огнеупоры, раскисление и др.).

Отдельно следует перепроверить качество и химический состав всех применяемых без исключения материалов, соприкасающихся с металлом и шлаком в сталеразливочном, промежуточном ковшах и в кристаллизаторе: ферросплавы, раскислители, шлакообразующие, модификаторы, флюсы, углеродосодержащие материалы, ШОС для промежуточного ковша и кристаллизатора УНРС.

Также необходимо провести аудит по применяемым огнеупорам в сталеплавильном производстве, соприкасающихся с металлом и шлаком на всех производственных участках (сталеплавильный агрегат, ковши и металлопроводка

для разливки стали). Далее оценить на данных участках возможные процессы окисления металла и неблагоприятное воздействие шлака по ключевым оксидам на применяемый огнеупор (эрозия).

После собранных данных выявляются «узкие» места в технологии производства высококачественной стали. Прежде всего следует отталкиваться от снижения качества металлопродукции (дефекты из-за включений как прямого, так и косвенного влияния) и возникающих аварийных и нештатных ситуаций из-за неметаллических включений по разливке металла на УНРС (затягивания металлопроводки, колебаний уровня металла в кристаллизаторе, прорывы). Лучший косвенный индикатор чистоты стали – общий кислород в металле, на который следует в первую очередь обратить внимание. Содержание общего кислорода в металле даёт общее представление об эффективности внепечной обработки, непрерывной разливки стали и отражает чистоту металла по оксидам. На сегодняшний день это один из лучших инструментов для регулярного мониторинга плавок стали на предмет их загрязнения оксидными включениями. Целесообразность контроля общего кислорода в промежуточном ковше подтверждается общепринятой практикой на других предприятиях, производящих высококачественную сталь с низким содержанием общего кислорода – «чистая сталь». Например, на одном из японских сталеплавильных заводов, производящих листовой прокат, применяется анализ содержания общего кислорода на каждой плавке [98]. Индикатор общего кислорода позволяет оперативно определить качество листового проката, установить необходимость дополнительного контроля листа или перевода продукции в низкий сорт (брак). Следует отметить, что данное требование по общему кислороду выставил потребитель металла – фирма Kawasaki [98].

В случае с проблемами производства стали, когда происходят изменения физико-химических свойств шлака в кристаллизаторе УНРС, необходимо поступать следующим образом. В первую очередь, следует стабилизировать процесс на выплавке и внепечной обработке стали по получению низкого содержания оксидов в сталеразливочном ковше, и во вторую очередь, решить задачи по получению «чистой стали» в промежуточном ковше. И после этого осуществляется кор-

ректировка шлака в кристаллизаторе УНРС. Именно такой алгоритм корректировки технологии производства «чистой стали» был разработан и применен автором диссертации с получением положительных результатов на АО «Выксунский металлургический завод» для трубного производства (Приложение Г).

Перед выполнением корректировки технологии следует исключить текущие отклонения (нарушения) в производстве, не связанных с неметаллическими включениями, которые могут ошибочно приводить к неверным выводам в случае ухудшения качества металла при реализации мероприятий. Например, как было показано в главе 4, могут формироваться дефекты на непрерывнолитом металле из-за разливки «чистой стали», при работе оборудования УНРС на неоптимальных режимах, то есть повышенный тепловой поток в кристаллизаторе из-за его конструкции и условий эксплуатации медных плит.

Параллельно в этом алгоритме корректировки должны быть внедрены мониторинг и контроль ключевых технологических параметров, которые представлены в Приложение Е. В таком случае, в режиме реального времени будут выявляться негативные элементы в действующей технологии и организации производства. В зависимости от условий производства, в некоторых случаях могут выявляться и устанавливаться совершенно новые ключевые технологические параметры, которые следует вводить на постоянный мониторинг и контроль.

Ключевой момент – это поиск баланса: качество-себестоимость-производство. Принятие окончательного решения, что и как изменять в технологии, должно осуществляться одним лицом или единственным центром. Например, экономист, менеджер или другие специалисты не смогут посчитать оптимальный (лучший) процесс раскисления и использования тех или иных материалов, в итоге будут сделаны выводы только по стоимости материала (самый дешевой или дорогой). Это приводит к ухудшению качества стали и производительности цеха, которые на металлургическом предприятии могут проявиться не сразу, а через определенный период времени (месяц, квартал, полугодие), когда будет произведено и отгружено достаточное количество металлопродукции. Часто на практике не учитывается баланс «качество-себестоимость-производство», который можно

объяснить следующим образом. Во-первых, спецификой металлургических предприятий, которые основное внимание уделяют снижению себестоимости стандартного продукта по стандартной технологии. Во-вторых, концепцией, ориентированной на снижение затрат, что показывают свою экономическую эффективность еще со времен Ф.У. Тейлора, результат их внедрения ясен и очевиден, в то время как результат, связанный с повышением функциональности, производимой стали, проявляется только через значительный промежуток времени. Необходимо видеть общую картину и в масштабе всей технологической цепочки, с учётом получаемой прибыли и фактических потерь из-за процессов, происходящих в технологии, что по итогу влияет на конечные технико-экономические показатели предприятия. Существуют примеры реализации проектов за рубежом (Япония, Швеция, Германия, Австрия и др.) по непрерывному поиску баланса «качество-себестоимость-производство», где выбор оптимума диктуется технологией производства высококачественной стали, а не производительностью и снижением себестоимости. Этот путь капиталоемкий по затратам на оборудование, его модернизацию и расходы на чистые материалы. Все это ориентировано на получение заказов с большей добавленной стоимостью на будущее производство высококачественной стали, которая востребована на рынке металлопродукции.

Необходимо также активно использовать методы автоматизированного управления производством, включая элементы математических и термодинамических моделей, а также алгоритмические подходы для построения статистических моделей с применением технологии машинного обучения. Другими словами, необходимо использовать все доступные современные инструменты и технологии для корректировки получения «чистой стали», а также рационально использовать их на практике как было представлено в главе 3.

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 футеровки промежуточного ковша (содержание примеси SiO_2 в торкрет-массе должно быть < 5 мас. %, $Fe_2O_3 < 1,0$ мас. % и в составе огнеупорного материала не должны содержаться оливины ($(Mg, Fe)_2SiO_4$) 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 (Al_2O_3-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).

С целью получения положительного результата, данные мероприятия необходимо внедрять одновременно. При реализации только одного мероприятия, например, отсечки ковшевого шлака, может привести к усилению процесса вторичного окисления через «кислый» шлак ($SiO_2 > 50$ мас. %, параграф 3.3 главы 3), который не будет разбавляться попадающим шлаком ковша перед каждой новой стыковкой плавки во время серийной технологии «плавка на плавку». В таком случае возможно увеличение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле из-за формирования большого количества включений в промежуточном ковше путём вторичного окисления. Или реализация только применения специальных ШОС для промежуточного ковша может привести к тому, что попадающий ковшевой шлак будет формировать твёрдый шлак в промежуточном ковше.

На основании полученных неудовлетворительных результатов, из-за отдельной реализации мероприятий, могут быть сделаны неверные выводы об эффективности этих мероприятий, что приводит к невозможности производства «чистой стали» в сталеплавильном цехе.

В результате применения разработанного комплекса технологических мероприятий производства высококачественной стали на всей технологической цепочке, начиная от выплавки жидкого полупродукта в сталеплавильном агрегате и до отгрузки высококачественного непрерывнолитого металла (заготовка или сляб), были достигнуты низкие уровни содержания общего кислорода и серы (не более 0,0020 и 0,0015 мас. % соответственно).

Представленный комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали с низким содержанием неметаллических включений является не исчерпывающим для применения его в других производственных условиях. Поэтому следует, исходя из текущих условий производства и действующей технологии, проводить аудит и определять значимые и эффективные мероприятия для последующей корректировки технологии производства с учётом повышенных требований к нему.

Алгоритм корректировки технологии производства «чистой стали»

Блок 1. Первый этап корректировки заключается в стабилизации технологического процесса выплавки и внепечной обработки стали, связанный с получением низкого содержания оксидов и сульфидов ($[O]_{\text{общ}} < 0,0015$ мас. % и $[S] < 0,0015$ мас. %), вредных примесей и газов в сталеразливочном ковше, а также ключевое – вся сталь должна проходить вакуумную обработку ($[H] < 0,00020$ мас. %). Вторым этапом – решение задачи по получению «чистой стали» в промежуточном ковше ($[O]_{\text{общ}} < 0,0020$ мас. % и $[H] < 0,00020$ мас. %).

Блок 2. После получения стабильной чистоты стали в промежуточном ковше выполняется корректировка физико-химических свойств ШОС для кристаллизатора УНРС по вязкости и основности. Ключевым моментом корректировки технологии производства «чистой стали» – это реализация трёх мероприятий одновременно: вакуумирование металла; применение специальных ШОС для промежу-

точного 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 математических 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 6.2 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 разливки стали. В этом случае

содержание и наполнение представленной схемы алгоритма на рисунке 6.2, которая обеспечивает наглядность и быстрый доступ к взаимосвязям всех составляющих её элементов, конкретизируются с учётом специфики рассматриваемого производства или завода.

Предложенный 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. 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.

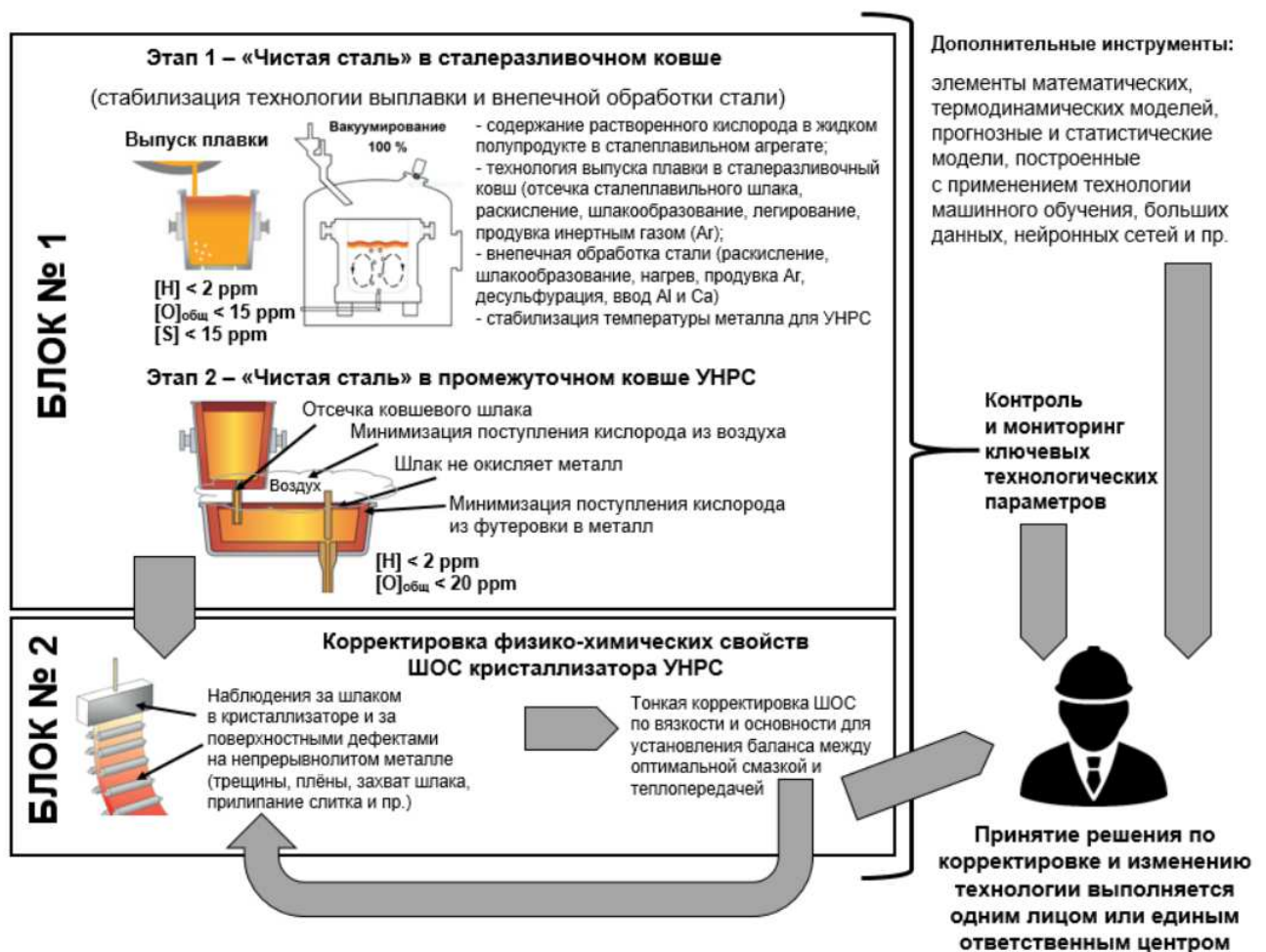


Рисунок 6.2 – Схема алгоритма корректировки технологии производства «чистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству

Поддержание достигнутой технологии производства «чистой стали»

После разработки и внедрения технологии производства «чистой стали» следует решить задачу по поддержанию достигнутой технологии в сталеплавильном производстве. Это задача носит организационный подход, так как следует разработать соответствующие стандарты как самой технологии, так и способы её соблюдения и контроля. Данный вопрос начинает свое решение уже после внедрения мониторинга и контроля ключевых технологических параметров, которые следует отслеживать на постоянной и регулярной основе. При этом внедренный мониторинг и контроль ключевых технологических параметров уже является работающим инструментом для поддержания достигнутой технологии. Внутренняя непрерывная коммуникация со всеми источниками поступления информации, по качеству стали и получаемых дефектов из-за неметаллических включений на последующих переделах, является важным для поддержания достигнутой технологии.

Кроме создания технологии и её контроля, важной составляющей всей этой работы является обучение и воспитание эффективного технологического персонала, который будет исполнять технологию производства «чистой стали».

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 строится от технологии, а не наоборот.

Выводы по главе 6

1. Разработан и внедрен алгоритм корректировки технологии производства «чистой стали», который учитывает негативные элементы производства данной

стали: вторичное окисление металла во время разливки, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, ухудшение технологических свойств работы шлака в кристаллизаторе УНРС.

2. Создан новый метод мониторинга и контроля технологии производства «чистой стали» в сталеплавильном производстве. Были определены ключевые технологические параметры, которые необходимо контролировать непрерывно в режиме реального времени и в случае каких-либо отклонений следует осуществлять соответствующие воздействие и корректировку на технологию.

3. Установленные важные технологические блоки производства «чистой стали» от выплавки до разливки стали и с внедрением мониторинга и контроля 25 ключевых технологических параметров, позволяют поднять общий уровень технологии до показателей лучших мировых практик за счёт оптимального пути совершенствования технологии (организационный или инвестиционный). В итоге, на практике возможно осуществлять корректировку технологии производства стали, связанной со снижением содержания в металле неметаллических включений на всей технологической цепочке (исключаются точечная и не эффективная корректировки), а также учитывать и обосновывать дополнительные мероприятия, которые могут исключать нежелательные элементы производства «чистой стали», на которые ранее не обращали внимание или они не были включены в комплекс решаемых задач.

4. В результате применения разработанного комплекса технологических мероприятий производства высококачественной стали были достигнуты низкие уровни содержания общего кислорода и серы (не более 0,0020 и 0,0015 мас. % соответственно). Представленный комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали с низким содержанием неметаллических включений является не исчерпывающим для применения его в других производственных условиях. Поэтому, исходя из текущих условий производства и действующей технологии, проводить аудит и определять значимые и эффективные мероприятия для последующей корректировки технологии производства с учётом повышенных требований к нему. При этом следует активно применять методы ав-

томатизированного управления производством, включая элементы математических и термодинамических моделей, а также алгоритмические подходы для построения статистических моделей с применением технологии машинного обучения.

5. Впервые было обращено внимание на важность организации производства в сталеплавильном цехе на всех переделах, с принятием решений в одном лице или единым ответственным центром, с целью поиска адекватного баланса и оптимума по таким показателям как себестоимость, производительность и качество непрерывнолитого металла.

6. Разработанный алгоритм корректировки технологии производства стали, связанный со снижением в металле неметаллических включений на всей технологической цепочке «выплавка-выпуск-внепечная обработка-разливка», позволяет сократить негативное воздействие на окружающую среду, так как получаемые результаты имеют прямое влияние на ресурсо- и энергоэффективность, а также на 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 получать гарантировано 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 деятельности 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 полу-

чения 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 ковше 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 разлива 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 непрерывнолите 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 невозможных 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.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benedicks, C. Non-metallic inclusions in iron and steel / C. Benedicks, H. Lofquist – London: Chapman and Hall, 1930. – 331 p.
2. Гильдебранд, Дж. Растворимость неэлектролитов / Дж. Гильдебран; пер. с англ. под ред. М.И.Темкина. – М.: ГОНТИ, 1938. – 166 с.
3. Richardson, F.D. The Ellingham diagram for metal oxides / F.D. Richardson, J. H. E. Jeffes // Iron and Steel Inst. – 1948. – Vol. 160. – P. 261-270.
4. Кожеуров, В.А. Термодинамика металлургических шлаков / В.А. Кожеуров. – Свердловск: Гос. н.-т. изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1955. – 163 с.
5. Плекингер, Е.// Проблемы современной металлургии / Е. Плекингер, М.Вальстер // 1960, № 6 (54). – С. 82-107.
6. Ploeger, E. – Iron and Steel Inst. – 1963. – Vol. 201. – № 7. – 576 p.
7. Чегринов, М.Г. Выплавка электростали для непрерывной разливки / М.Г. Чегринов. – М.: Металлургия, 1964. – 84 с.
8. Шульте, Ю.В. Неметаллические включения в электростали / Ю.В. Шульте. – М.: Металлургия, 1964. – 207 с.
9. Кислинг, Р. Неметаллические включения в стали // Р. Кислинг, Н. Ланге. – М.: Металлургия, 1968. – 121 с.
10. Нарита, К. Кристаллическая структура и свойства неметаллических включений / К. Нарита; пер. с японского. – М.: Металлургия, 1969 – 190 с.
11. Явойский, В.И. Раскисление углеродистых и низколегированных сталей / В.И. Явойский, Выног Тьюнг, Л.Ф. Горохов // Сталь. – 1970. – №3. – С. 228-233.
12. Манохин, А.И., Носоченко, О.В., Матевосян, Е.П. и др. // Сталь, 1970, № 2. – С. 1081-1084.
13. Войнов, С.Г. Рафинирование стали синтетическими шлаками / С.Г. Войнов, А.Г. Шалимов, Л.Ф. Косой и др. – М.: Металлургия, 1970 – 461 с.
14. Harkegard, G.A. // Jernkontorets Annaler, 1971, v. 155, № 6. – P. 289-297.

15. Виноград, М. И. Включения в легированных сталях и сплавах / М. И. Виноград, Г. П. Громова. – М.: Металлургия, 1972. – 214 с.
16. Литвинова, Т.И. Петрография неметаллических включений / Т.И. Литвинова, В.П. Пирожкова, А.К. Петров. – М.: Металлургия, 1972. – 184 с.
17. Непрерывная разливка стали. Науч. тр./МЧМ СССР. М.: Металлургия. – 1974. – № 2. – 208 с.
18. Ohno, T. Study of Large Nonmetallic Inclusions in Continuous Cast Al-Si Killed Steel // T. Ohno, T. Ohashi, H. Matsunaga, T. Hiromoto, and K. Kumai: Trans. ISIJ. – 1974. – Vol. 15. – P. 407-416.
19. Гуляев, А.П. Чистая сталь / А.П. Гуляев. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
20. Кожеуров, В.А. Статистическая термодинамика / В.А. Кожеуров. – М.: Металлургия, 1975. – 175 с.
21. Поволоцкий, Д.Я. Образование и поведение оксидных включений в жидком железе / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рошин // Изв. АН СССР. Металлы. – 1975. – № 1. – С. 15-21.
22. Пономаренко, А.Г. Термодинамика металлургических шлаков с учётом их электронного строения.: дисс...докт. техн. наук: 05.16.02 / Пономаренко Александр Георгиевич. – М., –1976. – 139 с.
23. Ландау, Л.Д. Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1976. – 584 с.
24. Куслицкий, А.Б. Неметаллические включения и усталость стали / А.Б. Куслицкий – Киев, Техника, 1976. – 125 с.
25. Brimacombe, J.K. Crack formation in the continuous casting of steel // J.K. Brimacombe, K. Sorimachi. Metallurgical Transaction B. – Vol. 8B. – 1977. – P. 489-505.
26. Лемпицкий, В.В., Шалимов, А.Г., Фульмахт, В.В. и др. // Сталь. – 1978. – № 5. – С. 398-405.

27. Shinohara, Y. Metallurgical design of UOE line pipe for sour service // Y. Shinohara, T. Hara, H. Nakasugi. Nippon Steel Technical Report. – 1979. – № 14. – 66 p.
28. Фомин, С.Я. Математическое моделирование металлургического производства. Курс лекций / С.Я. Фомин. – М.: МИСиС, 1979. – 64 с.
29. Brimacombe, J.K. Formation of longitudinal, midface cracks in continuously-cast slabs / J.K. Brimacombe, F. Weinberg, E.B. Hawbolt // Metallurgical Transaction B, 1979. – Vol. 10. – P.279-292.
30. Вишкарев, А.Ф. Теоретические основы комплексного раскисления стали / А.Ф. Вишкарев, А.С. Близнюков, В.И. Явойский // В сб. научн. тр. МИСиС «Влияние комплексного раскисления на свойства сталей». – М.: Металлургия, 1982. – С. 4-11.
31. Синярев, Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчётов металлургических процессов / Г.Б Синярев, Н.А Ватолин, Б.Г Трусов, Г.К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 263 с.
32. Лейтес, А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А.В. Лейтес. – М.: Металлургия, 1984. 200 с.
33. Неуймин, Я.Г. Модели в науке и технике / Я.Г. Неуймин. – Л.: Наука, 1984. – 189 с.
34. Новокщенова, С.М. Дефекты в стали / С.М. Новокщенова, М.И. Виноград, Б.А. Клыпин и др. // Справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
35. Gaye, H. Slag and Inclusion Control in Secondary Steelmaking / H. Gaye, S. Getellir, M. Nadif // Clean Steel. – Balatonfured: Hungary. – 1986.
36. Новиков, В.К. Полимерная модель бинарных силикатных расплавов, учитывающая переменную функциональность мономера / В.К. Новиков, Г.А. Топорищев // I Всесоюзн. конференция по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов, Свердловск, 17–19 сентября 1986 г.: Тезисы науч. сообщений, ч. 3. – Свердловск: ИМЕТ УНЦ АН СССР, 1986. – С. 17-19.

37. Гуляев, А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М.: *Металлургия*, 1986. 544 с.
38. Григорян, В.А. *Теоретические основы электросталеплавильных процессов* / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин. – М.: *Металлургия*, 1987. 272 с.
39. Малиночка, Я.Н. *Сульфиды в сталях* / Я.Н. Малиночка, Г.З. Ковальчук. – М.: *Металлургия*, 1988. – 246 с.
40. Глазов, В.М., Павлова, Л.М. *Химическая термодинамика и фазовые равновесия* / В.М. Глазов, Л.М. Павлова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: *Металлургия*, 1988. – 560 с.
41. Пономаренко, А.Г. *Термодинамическая модель для машинных экспериментов при оптимизации сталеплавильных и ферросплавных процессов* / А.Г. Пономаренко, Е.Н. Иноземцева, С.А. Храпко // *Сб. тезисов.* – Днепропетровск: *ВИНИТИ, ИЧМ* – 1988. – С. 147-153.
42. Svoboda, J.M. *Clean steel technology*. 1988. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/298689733_Clean_steel_technology (дата обращения: 18.02.2021).
43. *Обработка стали кальцием: Материалы международного симпозиума по обработке стали кальцием* / Пер. с англ.: под ред. и с предисловием Б.И. Медовара. – Киев: *ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР*, 1989. – 216 с.
44. Храпко, С.А. *Термодинамическая модель системы металл-шлак для АСУ и машинных экспериментов по оптимизации технологии сталеплавильного процесса: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02* / Храпко Сергей Александрович. – Донецк, 1990. – 81 с.
45. Югов, П.И. *Технологические основы производства чистых сталей в конвертерах* / П.И. Югов // *Сборник трудов I Международного конгресса сталеплавильщиков.* – Москва, 1993. – С. 48-50.

46. Рамонович, Д.А. Фильтрация низкоуглеродистой стали / Д.А. Рамонович, А.Г. Свяжин, В.В. Рябов и др. // Сборник трудов I Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1993. – С. 224-227.

47. Кэтуняну, Н. Рафинирование подшипниковой стали путём обработки жидкой стали в ковше с применением синтетических шлаков и вакуума / Н. Кэтуняну, М. Добреску // Сборник трудов I Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1993. – С. 242-243.

48. Ватолин, Н.А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.

49. Агарышев, А.И. Влияние технологических параметров на качество низкосернистой стали для обсадных труб / А.И. Агарышев, Б.Н. Катенин, С.М. Чумаков, В.Д. Кулешов и др. // Сборник трудов II Международного конгресса сталеплавильщиков. – Липецк: НЛМК, 1994. – С. 66-69.

50. Ганошенко, В.И. Семенченко и др. Оптимизация технологии раскисления металла алюминием / В.И. Ганошенко, О.В. Носоченко, А.В. Лакунцов, П.М. // Сборник трудов II Международного конгресса сталеплавильщиков. – Липецк: НЛМК, 1994. – С. 97-98.

51. Nakajima, K. Influence of mold heat flux on longitudinal surface cracks during high-speed continuous casting of steel slab / K. Nakajima, S. Hiraki, M. Kawamoto and T. Kanazawa. – The Sumitomo Search, 1994, №5. – P.32-39.

52. Лякишев, Н.П. Некоторые проблемы современного сталеплавильного процесса / Н.П. Лякишев // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 11-15.

53. Сальников, В.Д. Вторичное окисление при внепечной обработке за счёт атмосферы и шлака / В.Д. Сальников, А.Г. Свяжин, Д.А. Романович, В.Н. Хребин и др. // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 245.

54. Ганошенко, В.И. Особенности технологии производства низкокремнистой стали / В.И. Ганошенко, О.В. Носоченко, А.В. Гнедаш и др. // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 290-292.

55. Лузгин, В.П. Исследование процесса формирования неметаллических включений в кристаллизующемся металле / В.П. Лузгин, С.А. Близнюков, А.С. Близнюков // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 344-348.

56. Ковалев, А.Н. Совершенствование шлакообразующих смесей различного состава при непрерывной разливке стали на АО «НЛМК» / А.Н. Ковалев, С.М. Чиграй, В.Н. Пестов и др. // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 354-359.

57. Turkdogan, E.T. Fundamentals of Steelmaking / E.T. Turkdogan. – London: The institute of materials, 1996. – 331 p.

58. Григорович, К.В. Применение метода фракционного газового анализа для контроля качественного и количественного состава оксидных неметаллических включений / К.В. Григорович, В.И. Кашин, Д.И. Бородин // Сборник трудов III Международного конгресса сталеплавильщиков. – Москва, 1996. – С. 277-279.

59. Kim, K.-H. Effect of carbon and sulfur in continuously cast strand on longitudinal surface cracks / K.-H. Kim, T.-J. YEO, K.-H. OH and D.N. Lee // ISIJ International. – 1996. – №3 (36). – P. 284-289.

60. Пономаренко, А.Г. Управление сталеплавильными процессами на основе современных физико-химических представлений / А.Г. Пономаренко, П.И. Окоукони, С.А. Храпко, Е.Н. Иноземцева // Сборник трудов IV Международного конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформ», 1997. – С. 35-40.

61. Дагман, А.И. Комплексная технология производства стали для автолиста / А.И. Дагман, Ю.Ф. Суханов, В.Н. Хребин, А.Ф. Копылов, И.В. Сафонов // Сборник трудов IV Международного конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформ», 1997. – С. 46-48.

62. Ганошенко, В.И. Исследование изменения содержания алюминия на различных этапах технологии производства / В.И. Ганошенко, О.В. Носоченко, Л.С. Лепихов, В.П. Крутиков и др. // Сборник трудов IV Международного конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформ», 1997. – С. 92-95.

63. Kor, G. J. Ladle Refining and Vacuum Degassing, in The Making, Shaping, and Treating of Steel // G. J. Kor and P. C. Glaws / Steelmaking and Refining Volume, 11th ed., R. J. Fruehan, Ed. Pittsburgh, PA: The AISE Steel Foundation. – 1998. – P.661-714.

64. Fruehan, R.J. The making, shaping and treating of steel, 11th edition Steelmaking and refining Volume / R.J. Fruehan. – Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1998. – 759 p.

65. Чумаков, С.М. Направления развития сталеплавильного производства на ОАО «Северсталь» / С.М. Чумаков // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавильщиков. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 34-35.

66. Лоза, В.В. Особенности выплавки в открытых дуговых печах стали, удовлетворяющей требованиям зарубежных стандартов / В.В. Лоза, С.С. Казаков, В.А. Лейбензон, В.С. Грунин // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавильщиков. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 199-201.

67. Чумаков, С.М. Комплексная технология производства толстого листа с использованием установки ковш-печь / С.М. Чумаков, А.А. Смирнов, А.Л. Мясников, Н.Н. Крапивин, В.Б. Жиленков, Ю.Н. Кишкин // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавильщиков. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 328-329.

68. Фетисов, А.А. Влияние внепечной обработки на качество рельсового металла / А.А. Фетисов, Л.К. Федоров, Л.В. Минаева, В.В. Матвеев, А.В. Куклев // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавильщиков. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 331-333.

69. Хаазе, Р. Современные шлакообразующие смеси для непрерывной разливки стали / Р. Хаазе, Г. Шарф // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавильщиков. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 426-429.

70. Федоров, Л.К. Технология получения непрерывнолитых заготовок для производства рельсов в условиях НТМК / Л.К. Федоров, А.Я. Кузовков, В.В. Матвеев, А.А. Фетисов и др. // Сборник трудов V Международного конгресса сталеплавателей. – Рыбница: ММЗ, 1999. – С. 468-470.

71. Spaccarotella, A., Cimarelli, T., Capotosti, R. Process for the continuous casting of steel // European patent № 99107972.4 Date of publication 27.10.1999 Bulletin 1999/43.

72. Tsutsumi, K. Surface roughness of solidified mold flux in continuous casting process / K. Tsutsumi, T. Tagasaka, M. Hino // ISIJ International, Vol. 39 (1999), № 11. – P. 1150-1159. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/39/11/39_11_1150/_pdf/char/en (дата обращения: 04.02.2021).

73. Бигеев, А.М., Бигеев, В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Учебник для вузов, 3-е изд. перераб. и доп. Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.

74. Bannenberg, N. Metallurgie von Eisen und Stahl / N. Bannenberg. – 06-07 April 2000 Mainz Wissenschaftsverlag, Aachener Stahlkolloquium. – 2000. – P. 179-188

75. Maes, R. Application of Celox hoods in steel making / R. Maers, 2000.

76. Филяшин, М.К. Оптимизация технологии производства особонизкоуглеродистой стали / М.К. Филяшин, А.И. Дагман, В.Н. Хребин, Ю.Ф. Суханов // Сборник трудов VI Международного конгресса сталеплавателей. – Череповец: Северсталь, 2001. – С. 77-79.

77. Свяжин, А.Г. Удаление неметаллических включений при внепечной обработки стали / А.Г. Свяжин, Д.А. Романович, Е.Х. Шахпазов // Сборник трудов VI Международного конгресса сталеплавателей. – Череповец: Северсталь, 2001. – С. 333-337.

78. Григорович, К.В. Раскисление и шлаковое рафинирование кордовой стали / К.В. Григорович, В.Я. Дашевский, Н.Н. Макарова, В.И. Кашин, Н.П. Лякишев

// Сборник трудов VI Международного конгресса сталеплавателей. – Череповец: Северсталь, 2001. – С. 405-411.

79. Кренделев, В.Н. Освоение технологии производства вакуумированной подшипниковой стали ОАО «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ» / В.Н. Кренделев, С.С. Казаков, Л.Н. Король, А.Е. Коваль, В.М. Кулик, П.А. Шибeko // Сборник трудов VI Международного конгресса сталеплавателей. – Череповец: Северсталь, 2001. – С. 401-404.

80. Несвет, В.В. Повышение качества трубных заготовок из непрерывнолитого металла, отлитого на криволинейных МНЛЗ конвертерного цеха Днепровского металлургического комбината / В.В. Несвет, М.И. Пикус, А.В. Гресс, Л.М. Учитель, А.Н. Смирнов и др. // Сборник трудов VI Международного конгресса сталеплавателей. – Череповец: Северсталь, 2001. – С. 494-506.

81. Ahindra, G. Secondary steelmaking: Principles and Applications / G. Ahindra. – Washington: CRC Press, 2001. – 308 p.

82. Ежов, А.А. Дефекты в металлах: справочник-атлас / А.А. Ежов, Л.П. Герасимова – М.: Русский университет, 2002. – 359 с.

83. Дюдкин, Д.А. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток», 2002. – 296 с.

84. Дюдкин, Д.А. Новые технологические решения при внепечной обработке расплавов порошковыми проволоками / Д.А. Дюдкин, В.П. Онщук, С.Ю. Бать // Сталь. – 2002. – № 8. – С. 31-33.

85. Белов, Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы / Г.В. Белов. – М: Научный Мир, 2002. – 184 с.

86. Davies, R.H. CALPHAD: Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem / R.H. Davies, A.T. Dinsdale, J.A. Gisby, J.A.J. Robinson, S.M. Martin. – 26 (2002) 229 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0364591602000366>.

87. Andreson, J.-O. Thermo-Calc and Dictra, Computation tools for Materials Science // J.-O. Andreson, T. Helander, L. Houglund. – CALPHAD – 2002. – v.26. – № 2. – P.273-322 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0364591602000378>.

88. Stole, G. Secondary metallurgy. Fundamentals processes applications / G. Stole. – Düsseldorf: Steel Institute VDEh, 2002. – 216 p.

89. Мельник, С.Г. Снижение содержания неметаллических включений в стали для толстолистового проката / С.Г. Мельник, Л.С. Носоченко, О.Б. Лепихов // *Металлург*. – 2003. – № 8. – С.42-43.

90. Виноградов, С.В. Улучшение качества и разливаемости металла путем совершенствования технологии его раскисления при внепечной обработке / С.В. Виноградов, А.А. Фетисов, В.И. Жучков // *Металлург*. – 2003. – № 10. – С.45-47.

91. Dressel, G.L. High carbon silicon-killed steels nozzle clogging / G.L. Dressel // *Iron and Steelmaking*. – 2003. – № 12. – P. 26-29.

92. Zhang, L. Inclusions in Continuous Casting of Steel // L. Zhang, B.G. Thomas / XXIV National Steelmaking Symposium, Morelia, Mich, Mexico, 2003. – P. 138-183.

93. Fuhr, F. Relationship between nozzle deposits and inclusions composition in the continuous casting of steels / F Fuhr, C. Cicutti, G. Walter // *Iron and Steelmaking*. – 2003. – № 12. – P. 53-58.

94. Thomas, B.G. On-line detection of quality problems in continuous casting of steel // B.G. Thomas / Materials science & technology symposium, Chicago, TMS, 2003. – P. 29-45.

95. Cramb, A.W. Quantifying the Thermal Behavior of Slags / A.W. Cramb, // United States: Pittsburgh. – 2003. – 71 p.

96. Camisani-Calzolari, F.R. A review on causes of surface defects in continuous casting / F.R. Camisani-Calzolari, I.K. Craig, P.C. Pistorius // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2003. – 36(24). – P.113-121 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017376139?via%3Dihub> (дата обращения: 18.01.2021).

97. Mils, K.C. The role of mould fluxes in continuous casting – so simple yet so complex / K.C. Mils, A.B. Fox // *ISIJ International*. – Vol. 43. – 2003. – № 10. – P. 1479-1486. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/43/10/43_10_1479/_pdf/char/en (дата обращения: 02.02.2021).

98. Zhang, L. State of the Art Evaluation and control of steel cleanliness / L. Zhang, B.G Thomas // *ISIJ International*, Vol. 43 (2003), № 3. – P. 271-291. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/43/3/43_3_271/_article (дата обращения: 14.08.2015).

99. Jahanshahi, S. Sun, L. Zhang, J. S. *Afr. Inst. Min. Metall.* 104. – 2004. – P. 529.

100. Wänneberg, K. Study on Clean Steel: State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking / K. Wänneberg. – Brussels: IISI. 2004. – 504 p.

101. Толстоуцкий, А.А. Анализ и оптимизация технологии выплавки и внепечного рафинирования стали с использованием обобщенной термодинамической модели сталеплавильных процессов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Толстоуцкий Алексей Александрович – Москва, 2004. – 189 с.

102. Виноградов, С.В. Эффективность различных способов раскисления стали при внепечной обработке / С.В. Виноградов, В.В. Кромм, В.И. Жучков // *Электromеталлургия*. – 2004. – № 6. – С. 21-23.

103. Бокштейн, Б.С. *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник. Т.1 – Методы испытаний и исследования* / Б.С. Бокштейн, Ю.Г. Векслер, Б.А. Дроздовский и др.; Под общ. ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина, А.В. Супова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 688 с.

104. Cui, J. Progress of production technology of clean steel in Baosteel // J. Cui, Y. Zheng, L. Zhu / *Baoshan Iron and Steel Co., LTD. Technical Report*. – 2004. – 10 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.baosteel.com/english_n/e07technical_n/021402e.pdf (дата обращения: 14.02.2021).

105. Emi, T. Improving steelmaking and steel properties, *Fundamentals of Metallurgy* / T. Emi. – Ed. S. Seetharaman, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, Inst. Of Mater., Minerals & Mining. – 2005. – P. 503-554.

106. Степанов, А.А. Комплексное освоение технологии производства автолистовых сталей типа IF в конвертерном производстве ОАО «Северсталь» / А.А. Степанов, С.Д. Зинченко, А.М. Ламухин, С.В. Ефимов, С.В. Никонов и др. // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 90-94.

107. Добужская, А.Б. Исследование состава и источников поступления неметаллических включений, вызывающих образование контактно-усталостных дефектов в рельсах производства НТМК / А.Б. Добужская, А.А. Дерябин, В.Е. Семенов, В.А. Рейхарт. // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 156-159.

108. Казаков, С.В. Принципы регулирования количества неметаллических включений в стали на примере кордового металла / С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков, И.В. Кушнерев, П.В. Бизюков и др. // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 306-310.

109. Смирнов, Н.А. Внепечная обработка при производстве стали с особым содержанием серы / Н.А. Смирнов // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 376-383.

110. Зинченко, С.Д. Теория и технология удаления водорода, азота и серы на установках ковшевого вакуумирования стали большой емкости / С.Д. Зинченко, С.В. Ефимов, М.В. Филатов, А.В. Дуб, С.В. Гошкадера // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 423-427.

111. Зинченко, С.Д. Совершенствование технологии разлива стали типа IF / С.Д. Зинченко, С.В. Ефимов, С.В. Никонов, А.Л. Мясников, В.П. Загорулько, В.В. Смирнов // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 423-427.

112. Суханов, Ю.Ф. 10 лет совершенствования технологии производства низкоуглеродистой стали в ОАО «НЛМК» / Ю.Ф. Суханов, А.И. Дагман, В.Н. Хребин, М.К. Филяшин // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 423-427.

113. Григорович, К.В. Неметаллические включения в чистых сталях и методы их контроля / К.В. Григорович // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 609.

114. Майер, Л. Инновационные сталеплавленные технологии, осуществляемые на оборудовании фирмы СМС ДЕМАГ / Л. Майер, Г. Кляйншмидт, В. Лаубах и др. // Сборник трудов VIII Международного конгресса сталеплавателей. – Нижний Тагил: НТМК, 2005. – С. 619-626.

115. Thomas, B.G. Flow dynamics and inclusion transport in continuous casting of steel // B.G., Thomas, L. Zhang, Q. Yuan, S.P. Vanka / Design, Manufacture and Industrial Innovation Grantees Conf. Proceedings (Jan. 3-6, 2005, Scottsdale, AZ, USA). 2005. – 24 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ccc.illinois.edu/PDF%20Files/Publications/05_NSF_Gr_2005_BGThomas_v916.pdf (дата обращения: 01.07.2015).

116. Павлов, В.В. Дефекты и качество рельсовой стали: Справ. изд. / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев, Л.В. Корнева и др. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.

117. Поволоцкий, Д.Я. Физико-химические основы процессов производства стали: Учебное пособие для вузов / Д.Я. Поволоцкий. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 183 с.

118. Гудим, Ю.А. Обработка основными шлаками при внепечном рафинировании металла и её влияние на неметаллические включения в стали / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров // Электрометаллургия. – 2006. – № 6. С. 5-11.

119. Белов, Г.В. Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем и информационное обеспечение термодинамических расчетов: дисс. ... док. тех. наук. 05.13.18 / Белов Глеб Витальевич. – Москва, 2006. – 265 с.

120. Meng, Y. Simulation of microstructure and behavior of interfacial mold slag layers in continuous casting of steel / Y. Meng, B.G. Thomas // *ISIJ Int.* – 2006. – 46. – P. 660-669.

121. Zhang, L. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting / L. Zhang, B.G. Thomas // *Metallurgical and materials transactions.* – 2006. – 37B (10). – P. 733-761. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-006-0057-0> (дата обращения: 12.01.2021).

122. Чистов, В.П. Экспертные системы металлургических агрегатов с использованием законов нечёткой логики и неравновесной термодинамик / В.П. Чистов, А.Е. Пареньков, Е.Б. Иванов, В.Д. Малюгин, Ф.Л. Скуридин, Л.Ф. Серженко, Л.А. Залозная, С.Н. Падерин, А.В. Заводянный и др. // *Наука и производства Урала.* – 2006. – № 2. – С. 114-118.

123. Смирнов, А.Н. Свойства шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали с повышенной скоростью / А.Н. Смирнов, С.П. Макуров., М.Б. Епишев., А.Ю. Цупрун // *Электromеталлургия.* – 2007. – № 3. – С. 13-16.

124. Морозов, Ю.Д. Сталеплавильные проблемы и решения по модернизации технологии производства стали для газонепроводных трубопроводов / Ю.Д. Морозов, Б.Ф. Зинько // *Сборник трудов IX Международного конгресса сталеплавильщиков.* – Старый Оскол: ОЭМК, 2007. – С. 135-139.

125. Шахпазов, Е.Х. Современные направления развития ковшевой металлургии и проблема неметаллических включений в стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, А.А. Немтинов, С.Д. Зинченко, И.Г. Родионова, С.В. Ефимов, Н.А. Рыбкин, Н.Г. Шапошников // *Сборник трудов IX Международного конгресса сталеплавильщиков.* – Старый Оскол: ОЭМК, 2007. – С. 398-409.

126. Степанов, А.А. Разработка и освоение технологии производства штрипсового прокат с ограниченными требованиям по УЗК в условиях ОАО «Северсталь» / А.А. Степанов, С.Д. Зинченко, С.В. Ефимов, Е.А. Савинов, А.Б. Мальцев, М.В. Филатов, А.Б. Лятин // *Сборник трудов IX Международного конгресса сталеплавильщиков.* – Старый Оскол: ОЭМК, 2007. – С. 438-444.

127. Черепнев, А.С. Процессы вторичного окисления в сталеплавильном производстве / А.С. Черепнев, Г.И. Котельников, К.Л. Косырев // Сборник трудов IX Международного конгресса сталеплавильщиков. – Старый Оскол: ОЭМК, 2007. – С. 462-466.

128. Немтинов, А.А. Основные направления развития и достижения непрерывной разливки конвертерного производства ОАО «Северсталь» / А.А. Немтинов, С.Д. Зинченко, С.В. Никонов, Е.А. Савинов, А.Л. Мясников, С.В. Ефимов, А.Г. Лунев, В.Г. Ордин, В.П. Загорулько // Сборник трудов IX Международного конгресса сталеплавильщиков. – Старый Оскол: ОЭМК, 2007. – С. 615-619.

129. Аксельрод, Л.М. Разработка и внедрение комплекса мероприятий по снижению интенсивности формирования отложений в сталеразливочном тракте при непрерывной разливке металла на МНЛЗ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Аксельрод Лев Моисеевич – Москва, 2007. – 187 с.

130. Sahai, Y. Tundish technology for clean steel production / Y. Sahai, T. Emi. – New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. – 316 p.

131. Зайцев, А.И. Физическая химия металлургических шлаков / А.И. Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 352 с.

132. Fandrich, R. Actual review on secondary metallurgy / R. Fandrich, H.-B. Lungen, C.-D. Wuppermann // Rev. Met. Paris, 2008. – P. 364–374. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1051/metal:2008053> (дата обращения: 12.01.2021).

133. Degner, M. Steel Manual / Degner, M. et. al. – Düsseldorf: Steel Institute VDEh, 2008. – 189 p.

134. Клачков, А.А. Исследование закономерностей образования оксидных включений и совершенствование на этой основе технологии выплавки трубной котельной стали: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Клачков Анатолий Александрович – Москва, 2009 – 162 с. 135. Михайлов, Г.Г. Термодинамика металлургических процессов и систем / Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 520 с.

136. Шахпазов, Е.Х. Современные проблемы металлургии и материаловедения стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Радионова // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 25-34.

137. Нагуманов, Р.Ф. Исследование причин образования листа малоуглеродистой низкокремнистой стали с регламентируемым содержанием алюминия / Р.Ф. Нагуманов, В.П. Комшуков, Н.Г. Матвеев, А.В. Амелин, А.А. Алексеенко, Е.В. Байбекова // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 183-193.

138. Шахпазов, Е.Х. Современные физико-химические подходы к моделированию и управлению процессам ковшовой обработки стали / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, Б.В. Потапкин, Н.Г. Шапошников, И.Г. Родионова // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 425-434.

139. Юрьев, А.Б. Технология вакуумирования рельсовой электростали / А.Б. Юрьев, Л.А. Годик, Н.А. Козырев, Н.Н. Тиммерман, Т.П. Захарова и др. // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 456-459.

140. Ровнушкин, В.А. Исследование поведения неметаллических включений при вакуумуглеродном раскислении колесной стали / В.А. Ровнушкин, В.В. Кром, С.А. Спириин, Н.В. Мухранов, Ю.П. Петренко и др. // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 463-466.

141. Григорович, К.В. Влияние способа раскисления рельсовой стали на содержание и природу неметаллических включений / К.В. Григорович, А.С. Карпова, Б.В. Линчевский // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 484-487.

142. Дюдкин, Д.А. Влияние различных факторов на усвоение кальция из порошковой проволоки с комплексным наполнителем СК40 / Д.А. Дюдкин, В.В. Ки-

силенко // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 500-506.

143. Комшуков, В.П. Особенности продуктов вторичного окисления малоуглеродистой стали с регламентированным содержанием алюминия, образующихся на разных этапах обработки и разлива / В.П. Комшуков, Н.Г. Матвеев, А.А. Алексеенко, Е.В. Байбекова // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 513-522.

144. Шахпазов, Е.Х. Комплексное исследование влияния параметров ковшевой обработки, непрерывной разлива и последующих переделов стали на уровень отсортировки штрипсового металла по дефектам поверхности и УЗК / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Радионова, А.А. Немтинов и др. // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 629-637.

145. Ряшин, В.В. Эффективное применение торкрет-масс ООО «Группа Магнезит» в рабочей футеровки промежуточных ковшей ОАО «ММК» / В.В. Ряшин, Е.И. Поспелова, С.А. Перфильев, В.Ф. Дьяченко, И.М. Захаров, С.В. Шевченко // Сборник трудов X Международного конгресса сталеплавателей. – Магнитогорск: ММК, 2009. – С. 739-745.

146. Bale, C.W. FactSage thermochemical software and databases – recent developments / C.W. Bale, E. Belisle, P. Chartrand, S.A. Decterov, G. Eriksson, K. Hack, I.H. Jung, Y.B. Kang, J. Melancon, A.D. Pelton, C. Robelin, S. Petersen. – CALPHAD: Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem. Petersen 33. – 2009 – 295 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2008.09.009>.

147. Heaslip, L.J. Principles of clean steel production from furnace to mould / L.J. Heaslip, J.D. Drott. – VCR, 2009. – 222 p.

148. Алпатов, А.В. Термодинамические модели жидких многокомпонентных металлических расплавов / А.В. Алпатов, С.Н. Падерин // Электротехнология. – 2009. – № 9. – С. 28-36.

149. Mazumdar, D. Modeling of steelmaking processes / D. Mazumdar, J.W. Evans. – New York: CRC. Press Taylor & Francis Group, 2010. – 463 p.

150. Abraham, S. On-line superheat control model for continuously cast slabs and billets / S. Abraham, S. Chen // *Iron & Steel Technology*. – 2010. – Vol. 7. – № 7. P. 89-96.

151. Holappa, L. On physico-chemical and technical limits in clean steel production / L. Holappa // *Steel Research int.* – 2010. – № 10. – P. 869-874. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.201000203> (дата обращения: 14.06.2019).

152. Ботников, С.А. 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.

153. Botnikov, S.A. 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.

154. Куклев, А.В. Практика непрерывной разливки стали / А.В. Куклев., А.В. Лейтс. – М.: Metallurgizdat, 2011. – 432 с.

155. Ботников, С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С.А. Ботников // справочное изд. 2-е. Волгоград: Панорама, 2011. – 82 с.

156. Шахпазов, Е.Х. Ключевые направления развития металлургической технологии по обеспечению растущих требований к уровню, стабильности свойств и эксплуатационной надёжности массовых высококачественных сталей / Е.Х. Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Радионова // *Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков*. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 37-51.

157. Фомичев, М.С. Особенности производства транспортного металла на ОАО «НТМК» / М.С. Фомичев // Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 64-70.

158. Аксельрод, Л.М. Качественные и количественные изменения в производстве огнеупорных материалов в СНГ в 2000-2020 гг. / Л.М. Аксельрод // Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 77-90.

159. Кисиленко, В.В. Регулирование разливаемости на МНЛЗ раскисленных алюминием марок стали / В.В. Кисиленко, Д.А. Дюдкин // Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 660-666.

160. Фатеев, В.И. Система раннего обнаружения шлака при сливе металла из сталковша в промковш с использованием электромагнитного датчика / В.И. Фатеев, А.М. Формакидов // Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 443-447.

161. Дерябин, А.А. Улучшение условий удаления оксидных включений из рельсовой стали в промежуточном ковше / А.А. Дерябин, В.В. Могильный // Сборник трудов XI Международного конгресса сталеплавильщиков. – Нижний Тагил: НТМК, 2011. – С. 501-504.

162. Kaushik, P. How to evaluate a process for clean steelmaking and quality control / P. Kaushik, H. Yin, H. Pielet, M. Lowry // AISTech, Proceedings. – Volume II. – 2011. – P.493-505.

163. Morales, R. Process diagnosis on ULS steel cleanliness and redesign of the tundish at ArcelorMittal LC / R. Morales, J. Delgado-Pureco, R. Lule, S. Morales, F. Lopez // AISTech Proceedings. – Volume II. – 2011. – P. 681-695.

164. Kirschen, M. Optimum lining performance for particular process slags in metallurgical vessels supported by thermochemical modeling / M. Kirschen, R. Lanzemberger, B. Petritz, T. Prietl // AISTech Proceedings. – Volume II. – 2011. – P. 1289-1298.

165. Nafisi, S. Breakout Prevention Challenge / S. Nafisi, C.D Souza, L. Collins, E.S. Szekeres // AISTech 2011 Proceedings. – Vol. I. – P. 1609-1617.

166. Kromhout, J.A. Mould powder for high-speed continuous casting of steel / J.A. Kromhout. – Enschede, Nederland: Gildeprint drukkerijen, 2011. – 195 p.

167. Коренная, К.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: монография / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд. Центр ЮУрГУ, 2012. – 314 с.

168. Mandal, K. Development and implementation of an online process model for the control of steel chemistry and superheat during secondary steelmaking / K. Mandal, E. Miller, D. Pierce, P. Loomis, J. Novotny, G. Gurley, M. Pole // AISTech Proceedings. – 2012. – P. 1045-1053.

169. Chen, S. Continuous enhancement of the Evraz superheat model control for slab casting / S. Chen, C. D'souza, D. Evans, K. Dunnett, J. Burns, G. Sylvestre, C. Cannon // AISTech Proceedings. – 2012. – P. 1303-1315.

170. Holappa, L. Active tundish slag // L. Holappa, M. Kekkonen, S. Louhenkilpi, R. Hagemann, C. Schröder, P. Scheller / Ninth International Conference on Molten Slags. – Beijing: MOLTEN12, 2012 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pyrometallurgy.co.za/MoltenSlags2012/W167.pdf> (дата обращения: 04.01.2017).

171. Эфрон, Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали / Л.И. Эфрон – М.: Металлургиздат, 2012. – 696 с.

172. Abraham, S. Hydrogen and Nitrogen control and breakout warning model for casting non-degassed steel / S. Abraham, Sh. Chen, J. Asante, C. D'Souza // Iron & Steel Technology. – 2012. – October. – P. 54-64.

173. 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.

174. Белов, Г.В. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем / Г.В. Белов, Б.Г. Трусов. – М.: МГТУ, 2013. – 96 с.

175. Abraham, S. Development of an inclusion characterization methodology for improving steel product cleanliness / S. Abraham, J. Raines, R. Bodnar // AISTech. – 2013. – P.1069-1089.

176. Pretorius, E.B. An overview of steel cleanliness from an industry perspective / E.B. Pretorius, H.G. Oltmann., B.T. Schar // Proc. AISTech Conf. – 2013. – P. 993-1026.

177. Аксельрод, Л.М. Развитие огнеупорной отрасли – отклик на запросы металлургии / Л.М. Аксельрод // Сборник трудов XII Международного конгресса сталеплавильщиков. – Выкса: ВМЗ, 2013. – С. 11-18.

178. Чичкарев, Е.А. Раскисление и внепечная обработка кислородно-конвертерной рельсовой стали / Е.А. Чичкарев, О.Б. Исаев, Г.С. Гахеладзе, А.С. Рудюк, И.М. Кошулэ, И.Н. Костыря // Сборник трудов XII Международного конгресса сталеплавильщиков. – Выкса: ВМЗ, 2013. – С. 212-214.

179. Чичкарев, Е.А. Термодинамический анализ условий раскисления и внепечной обработки низкокремнистых марок стали / Е.А. Чичкарев, О.Б. Исаев, А.В. Цюцюра, А.В. Стефанец // Сборник трудов XII Международного конгресса сталеплавильщиков. – Выкса: ВМЗ, 2013. – С. 214-216.

180. Григорович, К.В. Исследование влияния концентрации элементов – раскислителей на образование дефектов слитка коррозионностойкой стали типа 08X18H10T / К.В. Григорович, Б.А. Румянцев, Я.И. Табаков // Сборник трудов XII Международного конгресса сталеплавильщиков. – Выкса: ВМЗ, 2013. – С. 219-221.

181. Селиванов, В.Н. Особенности шлакообразования в промежуточном ковше МНЛЗ с шамотной и магнезиальной футеровкой / В.Н. Селиванов, Э.В. Дюльдина, О.Ф. Рыбалко и др. // Сборник трудов XII Международного конгресса сталеплавильщиков. – Выкса: ВМЗ, 2013. – С. 283-286.

182. Story, S.R. Control of Ca-containing inclusions in Al-killed steel grades / S.R. Story, R.I. Asfahani // AISTech Proceedings. – 2013. – P.1201-1213.

183. Abraham, S. Inclusion engineering and the metallurgy of calcium treatment / S. Abraham, R. Bondnar, J. Raines // AISTech Proceedings. – 2013. – P.1243-1257.

184. Питюл, К.З., Ботников, С.А. 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.

185. Ботников, С.А. Анализ мощностей электросталеплавильного производства в России и прогноз потребления металлолома ЭСПЦ / А.Г. Ряполов, С.А. Ботников // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 21-23.

186. Лебедев, И.В. Повышение ассимилирующей способности шлакового расплава в промежуточном ковше при непрерывной разливке низкоуглеродистых сталей, раскисленных алюминием: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Лебедев Илья Владимирович – Москва, 2014 – 145 с.

187. Botnikov, S.A. 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/S096709121401014.

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

189. 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.

190. 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.

191. 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.

192. Ботников, С.А. 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.

193. Ботников, С.А. Применение непрерывнолитой заготовки круглого сечения для сортопрокатного производства / И.И. Лубе, С.А. Ботников, В.П. Турбар // Металлург. – 2014. – № 11. – С.52-54.

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

195. Botnikov, S.A. 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.

196. Seetharaman, S. Treatise on process metallurgy. Process phenomena. / S. Seetharaman, A. McLean, R. Guthrie, S. Sridhar // V. 2. – 2014. – 860 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elsevier.com/books/treatise-on-process-metallurgy/seetharaman/978-0-08-096951-0> (дата обращения: 10.01.2021).

197. Seetharaman, S. Treatise on process metallurgy. Industrial Processes / S. Seetharaman, A. McLean, R. Guthrie, S. Sridhar // V. 3. 2014. – 1744 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elsevier.com/books/treatise-on-process-metallurgy/seetharaman/978-0-08-096951-0> (дата обращения: 10.07.2015).

198. Laine, J. Temperature prediction for steel continuous casting / J. Laine, L. Holappa, S. Louhenkilpi // 2nd International Conference. – Kiev: AdMet, 2014. – P.1-11.

199. He, F. Hybrid model of molten steel temperature prediction based on ladle heat status and artificial neural network / F. He, D-F. He, A-J. Xu, H-B. Wang, N-Y. Tian // *Journal of Iron and Steel Research, International* 21. – 2014. – № 2. – P. 181-190.
200. Wang, Y. Continuous slab superheat control at SSAB Mobile / Y. Wang, S. Abraham, R. Bodnar, S. Richardson, C. Rawlinson // *AISTech Proceedings*. – 2014. – P. 1647-1657.
201. Hackl, G. Product development and flow optimization in the tundish by modeling and simulation / G. Hackl, D. Wappel, D. Meure, M. Tomas, R. Komanecky // *AISTech Proceedings*. – 2014. – P. 1911–1919.
202. Kumar, S. Improving surface quality of hot- and cold-rolled strips – a case study / S. Kumar, V. Hugo // *AISTech Proceedings*. – 2014. – P. 2945-2957.
203. Шалимов, А.Г. Инновационное развитие электросталеплавильного производства: монография / А.Г. Шалимов, А.Е. Семин, М.П. Галкин, К.Л. Косырев. – М.: Металлургиздат, 2014. – 306 с.
204. 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.
205. The Age of Smart, Safe, Cheap Robots is Already Here – «Эпоха умных, безопасных и дешевых роботов уже наступила» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hbr.org/2015/06/the-age-of-smart-safe-cheap-robots-is-already-here>
206. Lehut, T. ACCUOPTIXTM. Continuous temperature measurement system in the tundish / T. Lehut, A. Dörsel // *METEC and 2nd ESTAD*. – 2015. – P. 1-9.
207. Pavlovsky, R.J. Practical applications of surface inspection system at the hot mill / R.J. Pavlovsky, L. Galey, M.B. Assar, L. Zhang // *AISTech Proceedings*, 2015, P. 2734–2744.
208. Poirier, J. A review: influence of refractories on steel quality / J. Poirier // *Metallurgical Research and Technology*. – 2015. Vol. 112, № 410. – 20 p. – DOI: 10.1051/metal/2015028.

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

210. 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.

211. Botnikov, S.A. 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.

212. 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.

213. Белов, Г.В. Термодинамическое моделирование и термодинамическая информатика // Сайт Термоцентра им В.П. Глушко ИТЭС ОИВТ РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ihed.ras.ru/~thermo/thermocenter.htm> (дата обращения: 10.04.2015).

214. Фокин, И.В. Механизм и причины образования глубоких поверхностных дефектов на слябах при непрерывной разливке нержавеющей сталей, легированных титаном / И.В. Фокин, Ю.А. Гудим // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2016. – Вып. 16. – № 16 (3). – С. 56-62.

215. Zhao, D. Control of inclusion composition in calcium treated aluminum killed steels / D. Zhao, H. Li, Y. Cui, J. Yang // ISIJ International. – Vol. 56. – 2016. № 7. – P. 1181-1187.

216. Sutcliffe, N. MgO Based Inclusions in Aluminum Killed Steels / Sutcliffe N., Callahan M. // AISTech. – 2016. – P. 2517-2535.

217. Vert, T. Refractory material selection foe steelmaking / T. Vert, P.Eng. – New Jersey: The American Ceramic Society, Wiley. – 2016. – 372 p.

218. Аксельрод, Л.М. Роль огнеупоров в производстве «чистой стали» / Л.М. Аксельрод, И.В. Кушнеров // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 36-47.

219. Wappel, D. New improvements for dry setting tundish mixes / D. Wappel, R. Komanecky, V. Petritz, M.T. Casado // AISTech. – 2016. – P. 1647-1660.

220. Bhattacharya, T. Development of next-generation impact pads for producing ultraclean steel using mathematical models and plant trials / T. Bhattacharya, A.J. Brown, C.M. Muller, J.P. Angelo, M.S. Lee, K.N. Singh, P. Kaushik // AISTech. – 2016. – P. 1547-1572.

221. Jankovist, E. High value added refractories for high quality steelmaking / E. Jankovist, S. Chetlapalli, J. Cappel // IREFCON16. – Hyderabad: India. – 2016. – P. 13.

222. Ботников, С.А. Оптимизация технологии производства сталей, раскисленных алюминием, в условиях ЛПК / С.А. Ботников, Д.В. Моров, Г.В. Семернин // Сталь. – 2016. – № 2. – С. 23-28.

223. 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.

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

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

226. Ботников, С.А. Совершенствование мониторинга и контроля сквозной технологии производства рулонного и листового проката в ЛПК / Д.В. Моров,

С.А. Ботников и др. // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков. – Электросталь: Электросталь, 2016. – С. 502-511.

227. Падерин, С.Н. Термодинамические расчеты и анализ процессов раскисления трубной стали / С.Н. Падерин, Г.В. Серов, А.А. Комиссаров, С.М. Тихонов, Д.В. Кузнецов // Сталь. – 2017. – № 1. – С. 26-29.

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

229. Кудашов, Д.В. Освоение технологии внепечной обработки и разлива трубных сталей с требованием по стойкости в H₂S-средах в условиях Литейно-прокатного комплекса / Д.В. Кудашов, Е.С. Мурсенков, П.П. Степанов, Г.В. Семернин и др. // Metallurg. – 2017. – № 8. – С.48-62.

230. Karasev, A. Development of applied process metallurgy with respect to secondary refining processes / A. Karasev, Par G. Jonsson // 2017. – 42 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.bfi.de/en/wp-content/uploads/sites/3/disstec-seminar-2-170522-applied-process-metallurgy-joensson-kth_small.pdf.

231. Программа развития цифровой экономики Российской Федерации до 2035 года. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://spkurdyumov.ru/uploads/2017/05/strategy.pdf> (дата обращения 06.01.2021).

232. Soete, B. Tundish flow optimization in appear GENK quality improvement / Soete B., Warmers C., Bikkembergs E., Richaud J., Pieters B // ESTAD. – 2017. – P. 486-496.

233. Kim, T. Influence of rice husk ash on the reoxidation of molten steel in continuous casting tundish / T. Kim, J. Park, Y. Chung, L. Holappa // 9th ECCS European Continuous Casting Conference. – Vienna, 2017. – P. 571-577.

234. Kim, T.S. Effect of rice ash insulation powder on the reoxidation behavior of molten steel in continuous casting tundish / T.S. Kim, Y. Chung, L. Holappa // Metallurgical and Materials Transaction B. – 2017. – 48. – P.1736-1747.

235. Sengo, S. Tracing the origin of non-ferrous oxides in lamination defects on hot-rolled coils: mold slag entrainment vs submerged entry nozzle reaction products / S. Sengo, P.R. Triguero, E. Zinngrebe, F. Mennsonides // Metallurgical and Materials Transaction B. – 2017. – 48 (3). – P.1690-1702.

236. Кудрин, В.А. Технологические процессы производства стали: учебник / В.А. Кудрин, В.А. Шишимиров. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2017. – 320 с.

237. Ботников, С.А. Совершенствование технологии производства рулонного и листового проката в ЛПК ВМЗ / Д.В. Моров, С.А. Ботников, В.А. Ерыгин // Metallurg. – 2018. – № 1. – С.55-62.

238. Botnikov, S.A. 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.

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

240. Ботников, С.А. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС. Часть 1. Практические примеры оценки вторичного окисления / Д.В. Моров, С.А. Ботников, В.Н. Лавров // Чёрные металлы. – 2018. – № 9. – С. 34-39.

241. Ботников, С.А. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС. Часть 2. Термодинамические расчёты / Д.В. Моров, С.А. Ботников, В.Н. Лавров // Чёрные металлы. – 2018. – № 11. – С. 53-57.

242. Saqlain, M. Desphosphorization in ironmaking and oxygen steelmaking / M. Saqlain, M. Owais, J. Mika, V. Ville-Valtteri, F. Timo // University of Oulu, Finland. – 2018. – 42 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201806273570> (дата обращения: 13.02.2021).

243. Горкуша, Д.В. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки стали типа IF / Д.В. Горкуша, К.В. Григорович, А.В. Карасев, О.А. Комолова // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 272-276.

244. Аксельрод, Л.М. Альтернативная футеровка сталеразливочных ковшей, технический и экономический аспект / Л.М. Аксельрод, В. Гартен // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 9-17.

245. Ботников, С.А. Влияния геометрии сталевыпускного отверстия (эркера) дуговой сталеплавильной печи на производственные показатели Литейно-прокатного комплекса АО «ВМЗ» / Д.В. Морев, С.А. Ботников, В.Н. Лавров // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 243-249.

246. Лопатенко, А.Д. Исследование процессов рафинирования при производстве трубной стали с целью повышения качества готового изделия / А.Д. Лопатенко, С.А. Ботников, А.Е. Семин // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 283-287.

247. Ботников, С.А. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточной ковше УНРС / Д.В. Морев, С.А. Ботников, В.Н. Лавров // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 390-394.

248. Сафронов, А.А. Возможности регулирования механизма формирования оксидных неметаллических включений системы Al_2O_3 -CaO-MgO при производстве трубных сталей на оборудовании современных металлургических комплексов / А.А. Сафронов, В.С. Дуб, В.В. Орлов, К.Л. Косырев // Сборник трудов XV международного конгресса сталеплавильщиков. – Тула: ПМХ, 2018. – С. 547-556.

249. Nick, R.S. EU Supported Research Projects on Secondary Metallurgy Technology with Focus on Clean Steel – Evaluation of Results and Outlook to Future Developments / R.S. Nick, B. Kleimt, M. De Santis, J.C. Pierret, S. Millman // Proceedings

the 10th International Conference on CLEAN STEEL. – Budapest, 2018.

250. Мурсенков, Е.С. Особенности технологии модифицирования кальцием и церием трубной стали с требованием по стойкости в H₂S-средах / Е.С. Мурсенков, Д.В. Кудашов, В.В. Кислица и др. // *Металлург.* – 2018. – № 10. – С.27-35.

251. 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.

252. Aranda, V. Mold flow evaluation during production of IF steel grade with an advanced multiple measurement mold audit tool «ХМАТ» / V. Arand, F. Lourenco, L. Demuner, M. Miranda, T. Ramos, J. Minovsky, E. Hilgenhöner, S. Berns // *AISTech Proceedings.* – 2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-251.htm> (дата обращения: 02.04.2019).

253. Ito, J. Prevention of the surface cracks by new high basicity mold powders with ideal balance between softer heat removal in initial stage and sufficient total heat removal in the mold / J. Ito, S. Yamashita, Y. Iwamoto, D. Katayama // *Shinagawa Technical Report.* – Vol. 61. – 2018. – 10 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.shinagawa.co.jp/en/technical_report/pdf/No.31%20Prevention%20of%20the%20Surface%20Cracks%20by%20New%20High%20Basicity%20Mold%20Powder.pdf (дата обращения: 04.02.2021).

254. Сайт программы Thermo-Calc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermocalc.com> (дата обращения: 15.09.2019).

255. Сайт программы FactSage. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.factsage.com> (дата обращения: 15.09.2019).

256. Казаков, А.А., Житенев А.И., Салынова М.А. Использование статистики экстремальных значений для оценки неметаллических включений в сталях ответственного назначения / А.А. Казаков, А.И. Житенев, М.А. Салынова // *Современные проблемы электрометаллургии: сб. науч. тр. (часть 2) / под ред. В.Е. Рощина – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 102-107.*

257. Житенев, А.И. Разработка методов оценки неметаллических включений в стали транспортного назначения для совершенствования технологии её производства: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Житенев Андрей Игоревич – Санкт-Петербург, 2019 – 176 с.

258. Науменко, В.В. Освоение производства в условиях литейно-прокатного комплекса проката трубного назначения из хладостойких и стойких к сероводородному растрескиванию сталей системы микролегирования V-N / В.В. Науменко, О.А. Багмет, Е.С. Мурсенков. // *Металлург.* – 2019. – № 2. – С.42-52.

259. Прудковский, Б.А. Зачем металлургу математические модели? / Б.А. Прудковский – изд. 4-е – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 200 с.

260. Голлай, А.В. Методология управления развитием промышленных предприятий и корпораций на базе адаптивно-технологического подхода: дисс. ... док. техн. наук. 05.13.10 / Голлай Александр Владимирович. – Челябинск, 2019. – 297 с.

261. 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

262. 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.

263. 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.

264. 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.

265. Департамент сбыта IBM. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.ibm.co> (дата обращения: 12.08.2019).

266. Ботников, С.А. Разработка технологии чистой стали и её внедрение в условиях современных сталеплавильных цехов с комплексным учётом повышенных требований к качеству и производству / С.А. Ботников, Д.В. Мороз // Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Международной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация сталеплавильщиков», 2020. – С. 100-111.

267. Зинягин, Г.А. Технология производства и качество железа прямого восстановления / Г.А. Зинягин, Г.А. Дорофеев // Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Международной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация сталеплавильщиков», 2020. – С. 11-59.

268. Ботников, С.А. Базовые элементы технологии производства «чистой стали» в современном электрометаллургическом комплексе / С.А. Ботников // Чистая сталь от руды до проката – 2020: сб. статей I Международной конференции / под ред. К.Л. Косырева – Москва: МОО «Ассоциация сталеплавильщиков», 2020. – С. 174-179.

269. Формулировки термина «чистая стали» на сайте компании Key to Metals AG. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=196> (дата обращения: 14.12.2020).

270. Ботников, С.А. 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.

271. Botnikov, S.A. 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.

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

273. De Cooman B.C. Iron and steelmaking. Essentials / GIFT, POSTECH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gift.postech.ac.kr> (дата обращения: 15.01.2021).

274. World Steel about steel statistics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html> (дата обращения: 12.02.2021).

275. Сайт металлургического завода Aichi Steel – Режим доступа: <https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/index.html> (дата обращения: 13.02.2021).

276. Сайт металлургического завода Steel & Sumitomo Metals Corporation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tubular.nipponsteel.com/ru/product-services/octg/materials/manufacturing-process/cs-martensitic> (дата обращения: 13.02.2021).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Фактические данные для расчёта равновесного состояния в системе «металл-шлак-газовая фаза» для выпуска плавки

Таблица А.1 – Химический состав жидкого полупродукта в дуговой сталеплавильной печи для стали К56 (мас.%)

[C]	[O] _{раст.}	[Mn]	[Si]	[S]	[P]	[Al]	[N]	[Cr]
0,0300	0,1250	0,0600	0,0090	0,0300	0,0050	0,0005	0,0060	0,065

Таблица А.2 – Химический состав печного шлака для стали К56 (мас. %)

(FeO)	(MnO)	(CaO)	SiO ₂	(MgO)	(S)	(P ₂ O ₅)	(Al ₂ O ₃)	(Cr ₂ O ₃)	Fe
32,28	7,46	31,27	16,69	3,28	0,09	0,55	3,98	3,14	1,26

Таблица А.3 – Химический состав жидкого полупродукта в дуговой сталеплавильной печи для стали 20 (мас. %)

[C]	[O] _{раст.}	[Mn]	[Si]	[S]	[P]	[Al]	[N]	[Cr]
0,080	0,0550	0,1500	0,0200	0,0330	0,0080	0,0007	0,0050	0,083

Таблица А.4 – Химический состав печного шлака для стали 20 (мас. %)

(FeO)	(MnO)	(CaO)	(SiO ₂)	(MgO)	(S)	(P ₂ O ₅)	(Al ₂ O ₃)	(Cr ₂ O ₃)	Fe
23,71	7,37	36,26	19,55	3,00	0,09	0,60	4,73	2,49	2,20

Таблица А.5 – Химический состав ферроалюминия FeAl50 (мас. %)

Al	Si	S	P
49	5	0,0400	0,0500

Таблица А.6 – Химический состав карбида кальция CaC₂ (мас. %)

CaC ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	C
72,5	21,3	0,4	1,5	1,0	2,0	0,3	1,0

Таблица А.7 – Химический состав ферросиликомарганца FeSiMn17 (мас. %)

Si	Mn	C	P	S	N
18,5	71,0	1,6	0,19	0,0150	0,0072

Таблица А.8 – Химический состав ферросилиция FeSi65 (мас. %)

Si	Mn	C	P	S	N	Al
67,00	0,30	0,08	0,03	0,0100	0,0200	1,20

Таблица А.9 – Химический состав ферромарганца FeMn065 (мас. %)

Si	Mn	C	P	S	N
0,80	96,50	0,10	0,05	0,0500	0,0250

Таблица А.10 – Химический состав свежообожжённой извести (мас. %)

CaO	MgO	SiO ₂	P	S
96,6	0,50	0,70	0,0060	0,0300

Таблица А.11 – Химический состав флюса на основе Al₂O₃ (мас. %)

Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	TiO ₂	S
59,50	2,69	8,00	6,80	0,10	0,58

Таблица А.12 – Схема отдачи материалов на выпуске плавки из печи в ковш для стали К56 и стали 20

Марка стали	БУНКЕР №1, кг (отдача материалов при наполнении ковша металлом 32-48 тонн)				БУНКЕР №2, кг (отдача материалов при наполнении ковша металлом 74-70 тонн)		
	FeAl50	FeSiMn17	FeSi65	FeMn965	CaO	Al ₂ O ₃	FeAl50
К56	350	1334	380	1209	800	300	50
20	250	508	0	900	800	300	50

Вес жидкого расплава, выпускаемого в ковш – 156 т
Температура жидкого металла - 1650 °С

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты количественной оценки фазового состава тугоплавких отложений от разливочных стаканов УНРС после серийной разливки плавов и фрагменты дифрактограмм с результатами расшифровки

Таблица Б.1 – Результаты оценки фазового состава отложений с затягиванием разливочного стакана УНРС (мас. %)

Название соединения		Герцинит	Магниева шпинель	Корунд	Ибонит	Гроссит	Алюминат кальция	Майенит	Прочее (фрагменты огнеупоров, окисленная сталь и др.)
Температура плавления соединения, °С		~1780	~2015	~2050	~1830	~1727	~1595	~1400	
Рис. №	Марка стали	△	+	следы	▼	■	●	нет	
		FeO·Al ₂ O ₃	MgO·Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO·6Al ₂ O ₃	CaO·2Al ₂ O ₃	CaO·Al ₂ O ₃	12CaO·7Al ₂ O ₃	
Б.1	09ГСФ	18	28	0	0	6	-	-	48
Б.2	09ГСФ	22	10	5	5	37	следы	-	21
Б.3	Ст10	-	42	-	-	3	-	-	55
Б.4	Ст20	-	18	-	-	42	-	-	40
Б.5	22ГЮ	-	27	-	-	24	-	-	49
Б.6	К56	-	9	3	6	20	-	-	62
Б.7	Ст2пс	-	-	-	7	25	-	-	68
Б.8	13ХФА	-	26	-	-	24	-	-	50
Б.9	P235GH	-	32	-	-	25	-	-	43
Б.10	К56	-	17	-	-	31	-	-	52
Б.11	Ст2пс	-	10	-	-	39	-	-	51

Таблица Б.2 - Результаты оценки фазового состава отложений без затягивания разливочного стакана УНРС (мас. %)

Название соединения		Герцинит	Магниева шпинель	Корунд	Ибонит	Гроссит	Алюминат кальция	Майенит	Прочее (фрагменты огнеупоров, окисленная сталь и др.)
Температура плавления соединения, °С		~1780	~2015	~2050	~1830	~1727	~1595	~1400	
Рис. №	Марка стали	△	+	нет	▼	■	●	следы	
		FeO·Al ₂ O ₃	MgO·Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO·6Al ₂ O ₃	CaO·2Al ₂ O ₃	CaO·Al ₂ O ₃	12CaO·7Al ₂ O ₃	
Б.12	09Г2С	-	36	-	-	6	40	3	15
Б.13	22ГЮ	-	22	-	-	21	34	-	23
Б.14	К55	-	42	-	-	10	43	-	5
-	22ГЮ	-	48	-	-	17	11	5	19
-	22ГЮ	-	50	-	-	13	15	5	17
-	22ГЮ	-	44	-	-	2	8	-	46

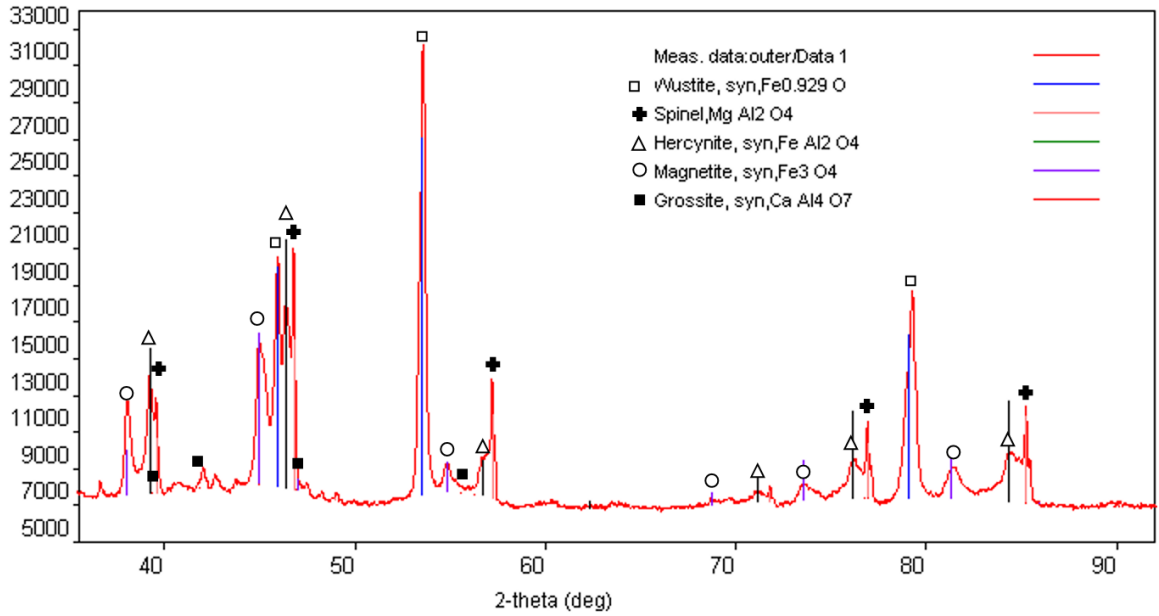


Рис. Б.1 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

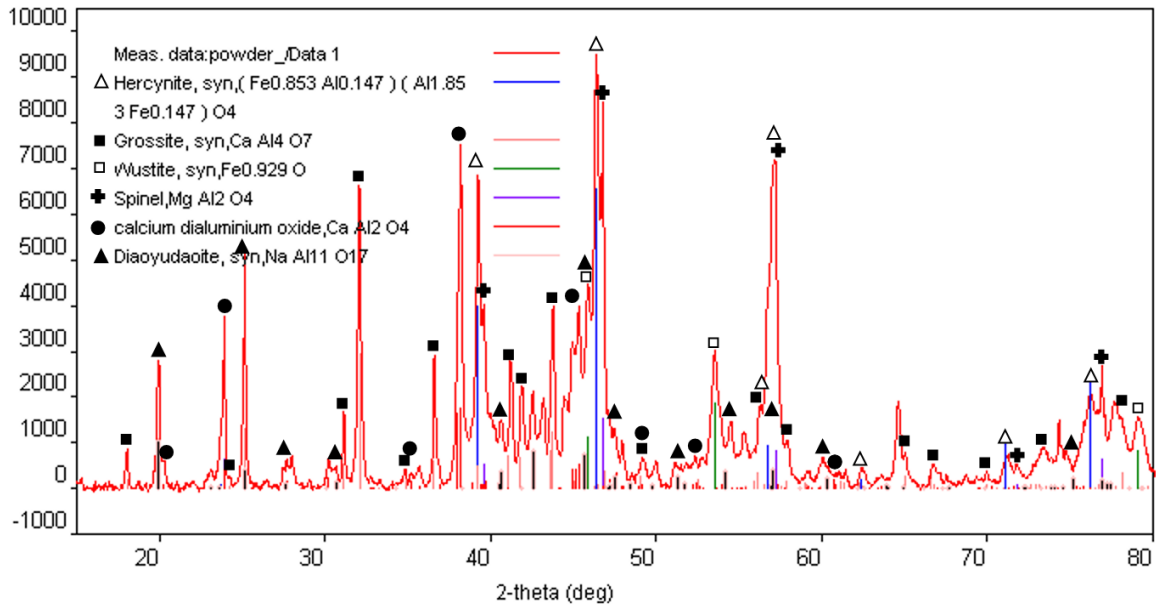


Рис. Б.2 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

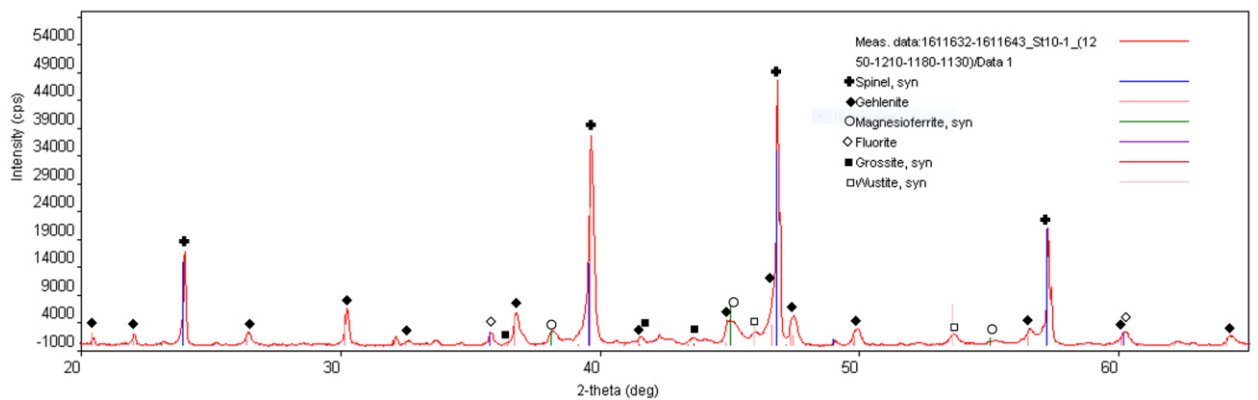


Рис. Б.3 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

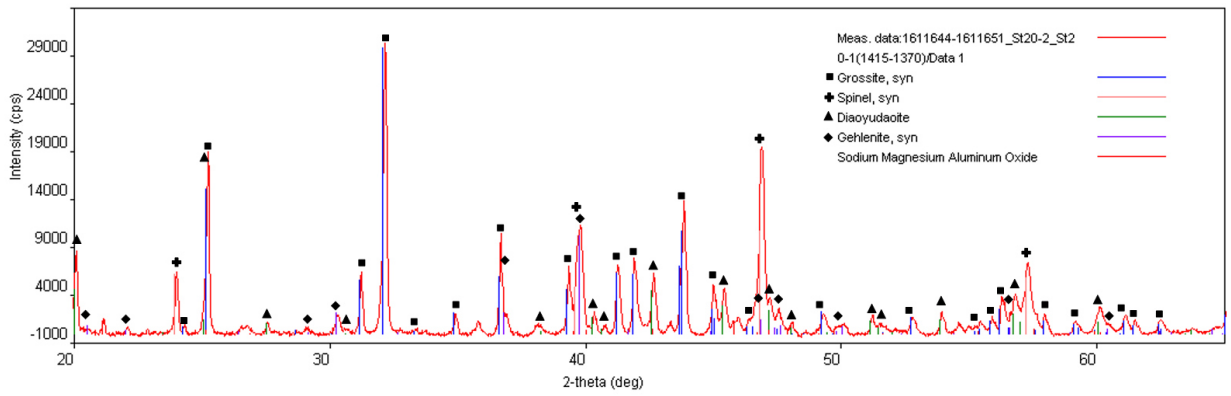


Рис.

Б.4 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

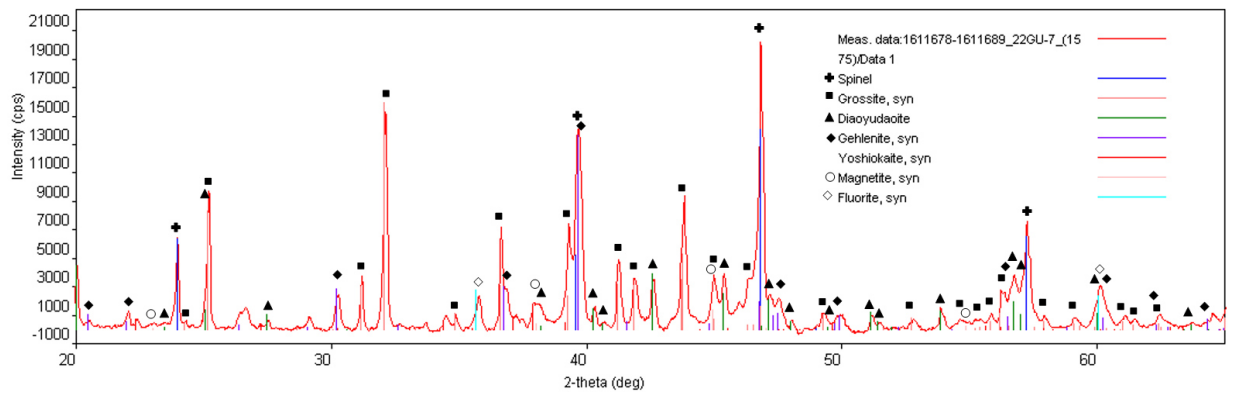


Рис. Б.5 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

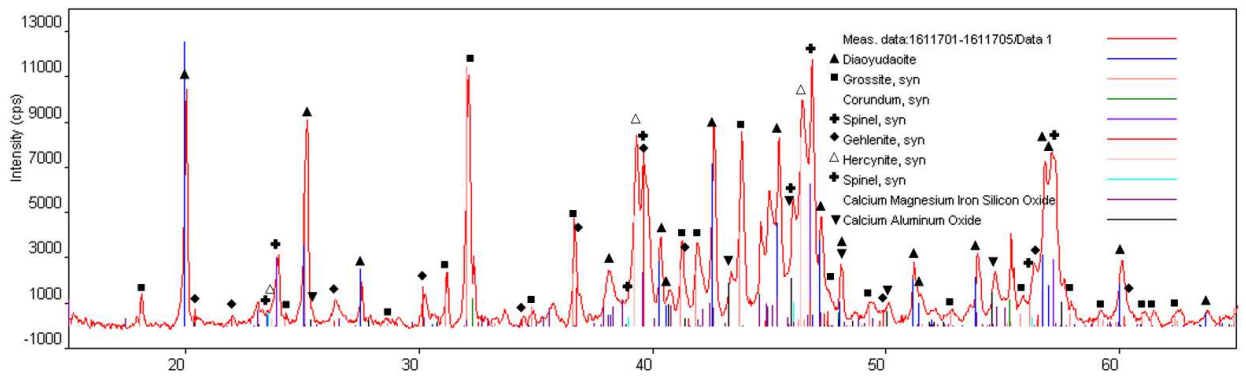


Рис. Б.6 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

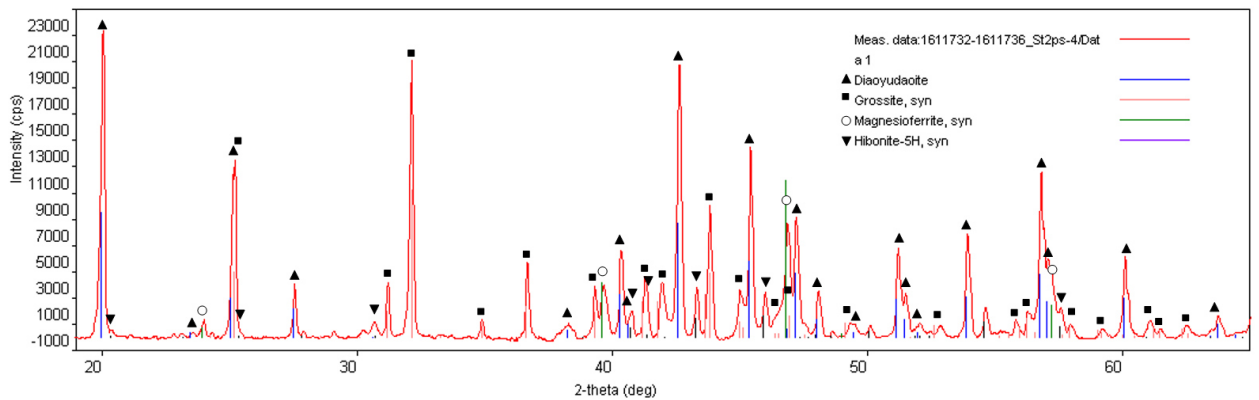


Рис. Б.7 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

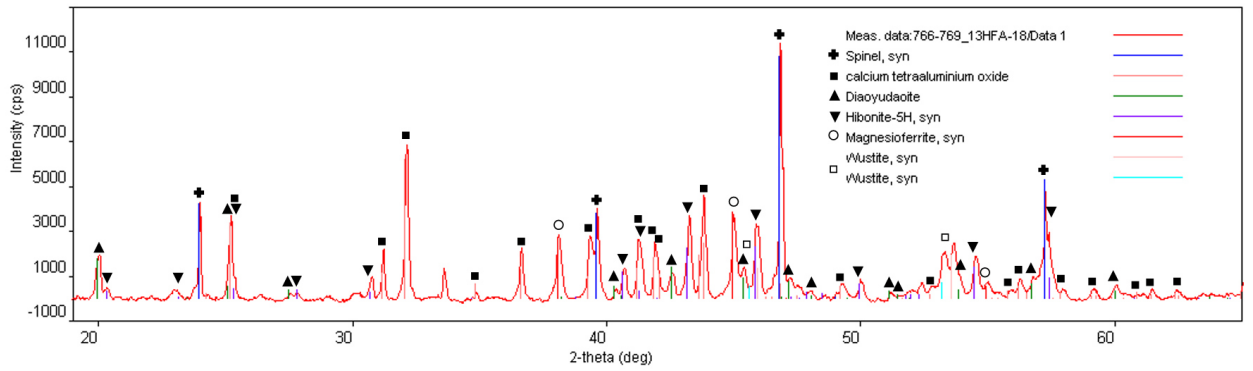


Рис. Б.8 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

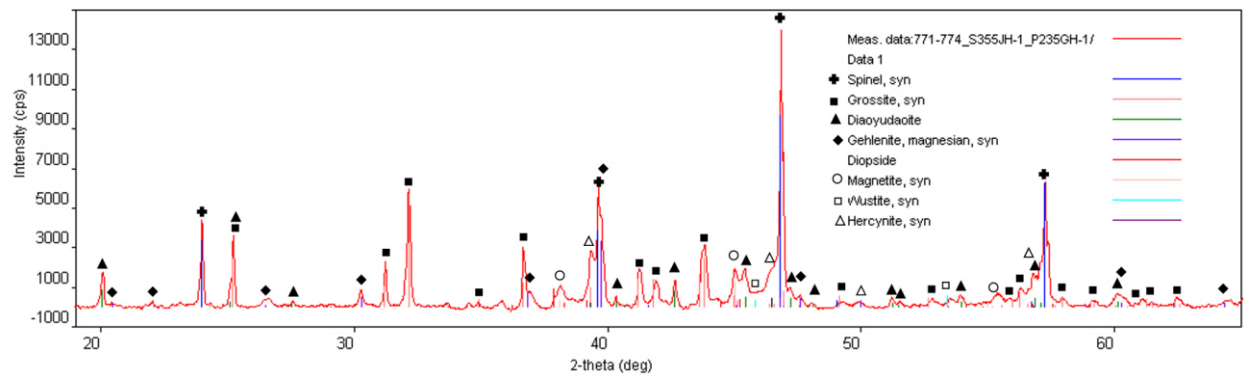


Рис. Б.9 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

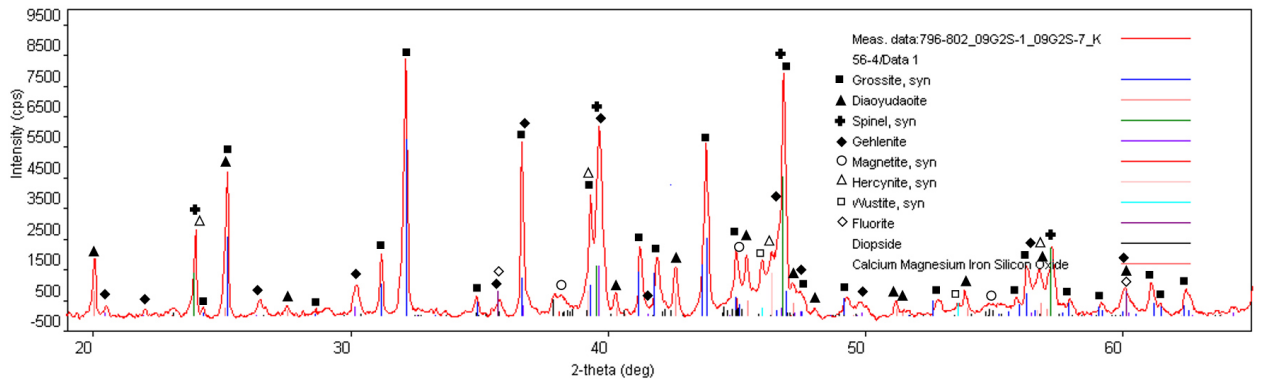


Рис. Б.10 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

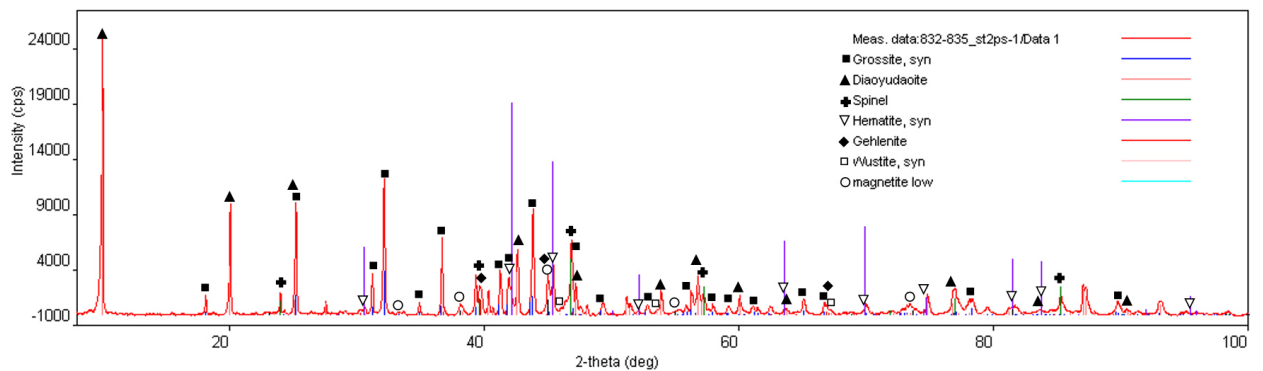


Рис. Б.11 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

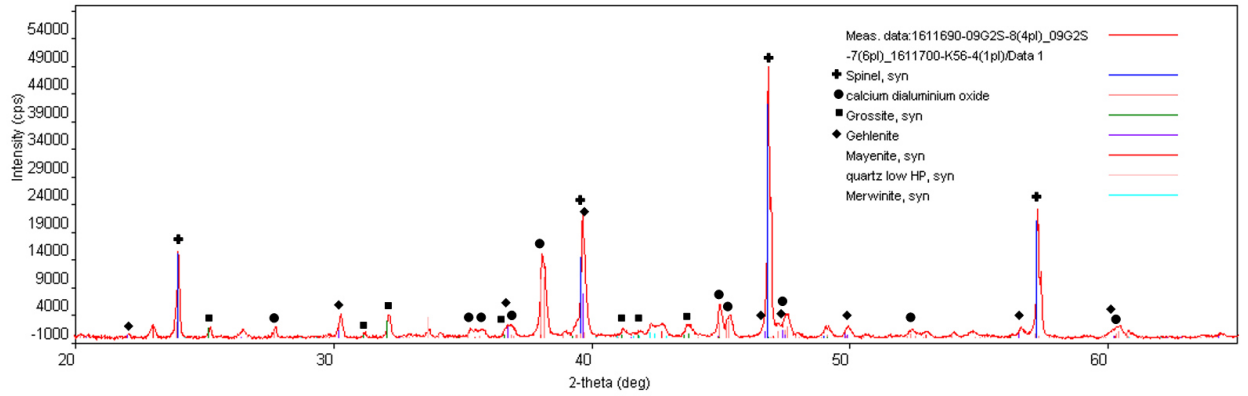


Рис. Б.12 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

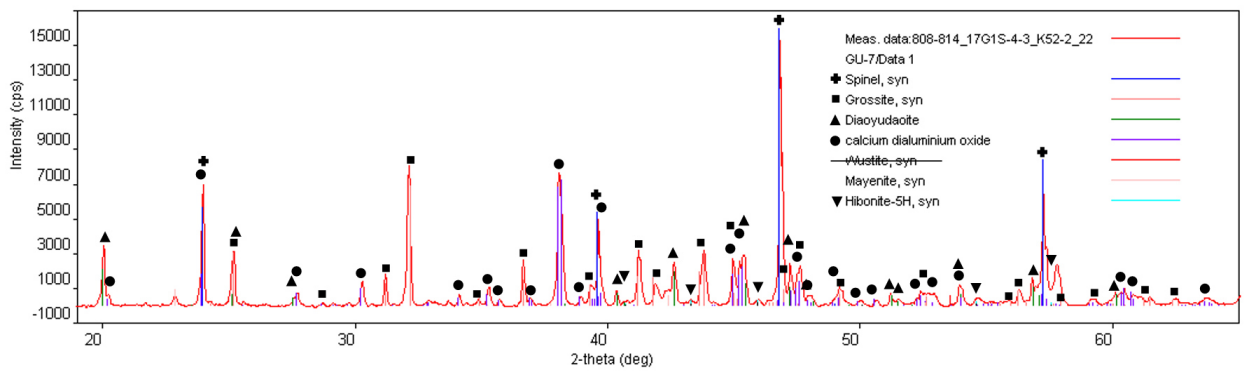


Рис. Б.13 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

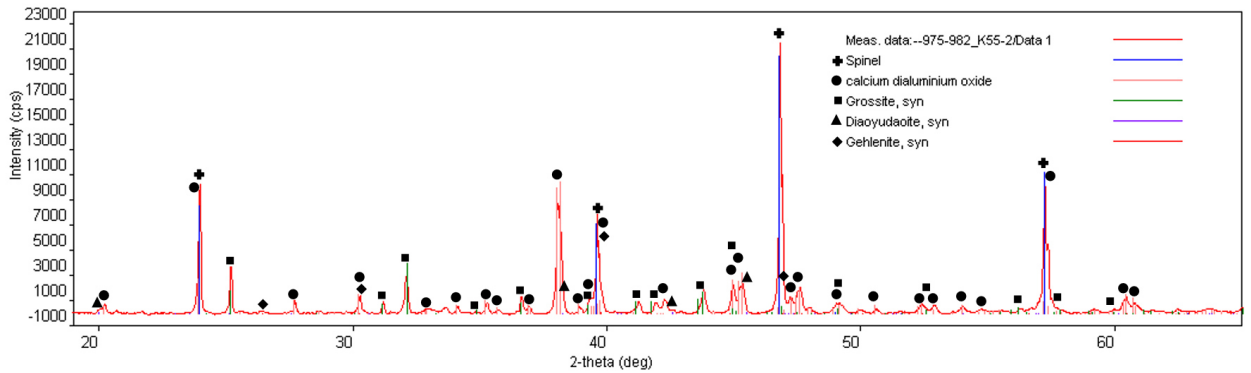


Рис. Б.14 – Фрагмент дифрактограммы с результатом расшифровки

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Обновлённая информация для классификатора дефектов непрерывнолитого металла, связанных на прямую или косвенно с содержанием в металле неметаллических включений

В.1 Раскатанное загрязнение

Дефект поверхности обнаруживается визуально (рисунок В.1), в виде вытянутого в направлении деформации раскатанного поверхностного загрязнения (пятен и/или полос цвета отличного от основного металла) литой заготовки (сляба) шлаком из кристаллизатора, огнеупором или «смывом» включений с разливочного стакана УНРС. Может сопровождаться тонким отслоением языкообразной формы деформированного металла. Расположение дефекта по длине и ширине проката не закономерное (хаотичное). В сечении дефекты представляют собой полость, заполненную неметаллическими включениями. В районе дефекта может наблюдаться значительная неоднородность структуры. Размер, форма и глубина залегания могут варьироваться в широких пределах. По месту дефекта в сечении металлографические исследования показывают наличие таких элементов, как Ca, Al, Mg, Zr, Na, K, F, Si, Ce, La, Ti. Может быть также типом пленки № 1 из-за содержания в металле неметаллических включений.

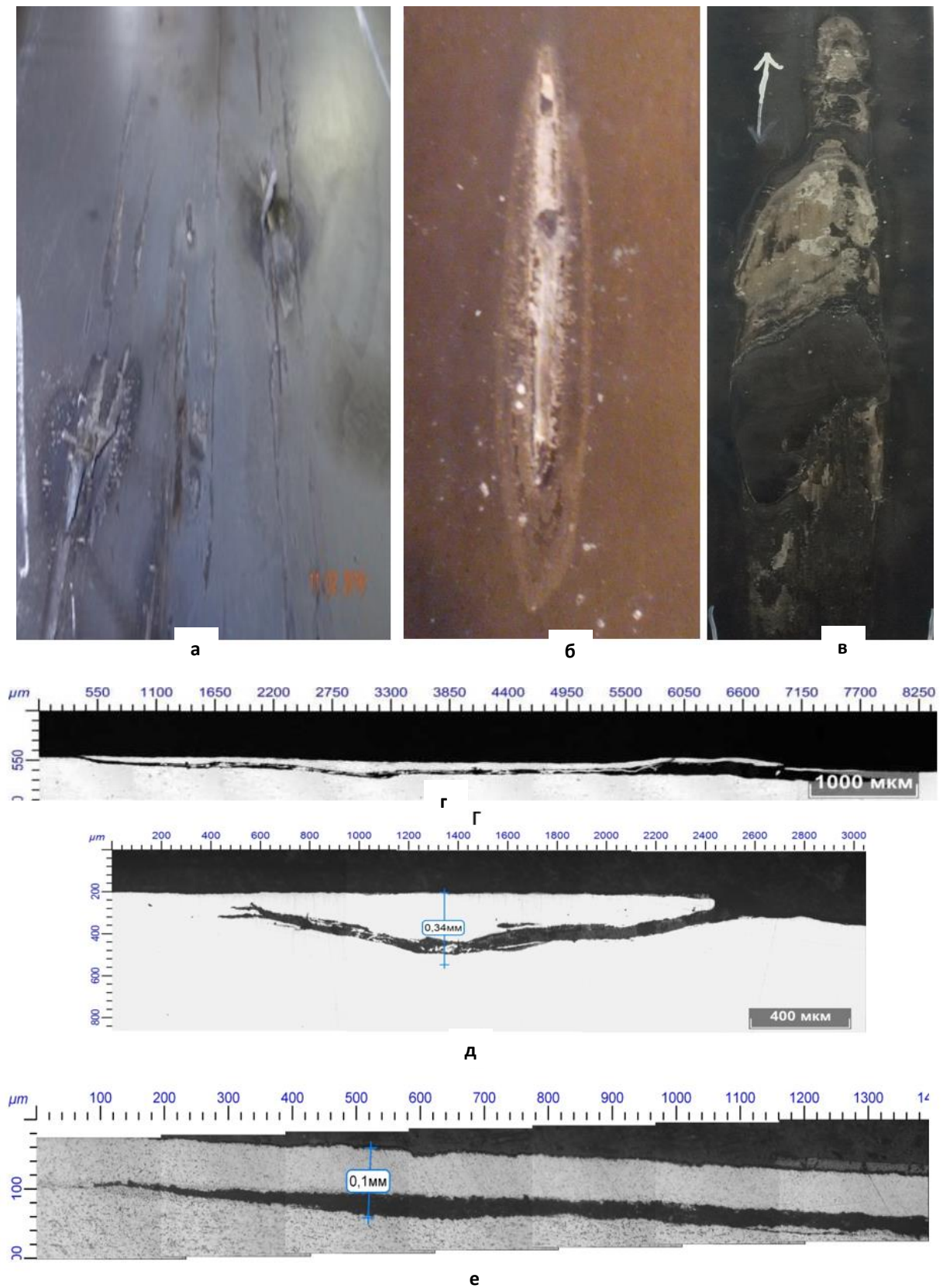


Рис. В.1 – Внешний вид дефекта «раскатанное загрязнение» (а, б, в) и микроструктура дефекта (г, д, е)

Таблица В.1 – Раскатанное загрязнение

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - захват затвердевающим металлом включений, всплывающих на поверхность жидкого металла при заполнении кристаллизатора; - захват шлаковой смеси потоком металла при нестабильной разливки (не стабильный уровень металла в кристаллизаторе); - вымывание тугоплавких отложений с поверхности стопора и с погружного разливочного стакана в тело слитка; - сильное и/или локальное вторичное окисление металла в промежуточном ковше или в кристаллизаторе; - не качественная шлакообразующая смесь (ШОС) в кристаллизаторе или перенасыщение ШОС Al_2O_3 (образование гарнисажа) 	<ul style="list-style-type: none"> - снижение уровня металла в промежуточном ковше (ниже нормируемого) или выдержка в промковше низкого уровня металла в течение длительного времени разливки; - повышенное содержание оксидов в сталеразливочном ковше, из-за несоблюдения технологии выпуска плавки и внепечной обработки металла (в металле находится повышенное содержание элементов - продуктов раскисления, вторичного окисления металла и огнеупорных материалов); - эрозия (размыв) огнеупоров (низкое качество огнеупоров и сверх высокая концентрация в металле кальция $Ca > 25$ ppm); - разливка холодного металла (перегрев над температурой ликвидуса меньше 5-10 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> - внедрение в производство элементов технологии «чистая сталь»; - стабилизация уровня металла в кристаллизаторе и снижение его колебаний до уровня STD не более 0,85 (цель STD < 0,55); - для слывовых УНПС, где имеются нестабильные потоки металла в кристаллизаторе установка электромагнитного торможения в кристаллизаторе (ЭМТ); - подбор дизайна погружного стакана и ШОС для кристаллизатора; - стабилизация температурного режима разливки стали (перегрев над температурой ликвидус от 15 до 30 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> - дефектная часть вырезается; - при грубом дефекте металл бракуется с переводом в лом 	<ul style="list-style-type: none"> - не допустимый дефект для проката

В.2 Плена «мелкая». Тип плены № 1 из-за содержания в металле неметаллических включений

Дефект поверхности обнаруживается визуально (рисунок В.2), расположен на верхней и/или нижней стороне проката. Представляет собой языкообразные, вытянутые вдоль направления прокатки отслоения, частично соединенные с основным металлом рулонного проката, может иметь характерный «ореол». Дефект может быть единичным, групповым и массовым. Расположение дефектов (или групп дефектов) незакономерное (хаотичное), в расположении дефектов не наблюдается периодичность. В сечении дефекты представляют собой надрывы, трещины у поверхности металла, заполненные окалиной и сопровождающиеся обезуглероживанием и диффузионными окислами. В самом дефекте и (или) в его продолжении могут также присутствовать скопления вытянутых вдоль направления прокатки неметаллических включений, основными элементами которых являются Ca, Al, Mg, Zr,

Na, K, F, Si, Ce, La, Ti. В районе дефекта может наблюдаться значительная неоднородность структуры.

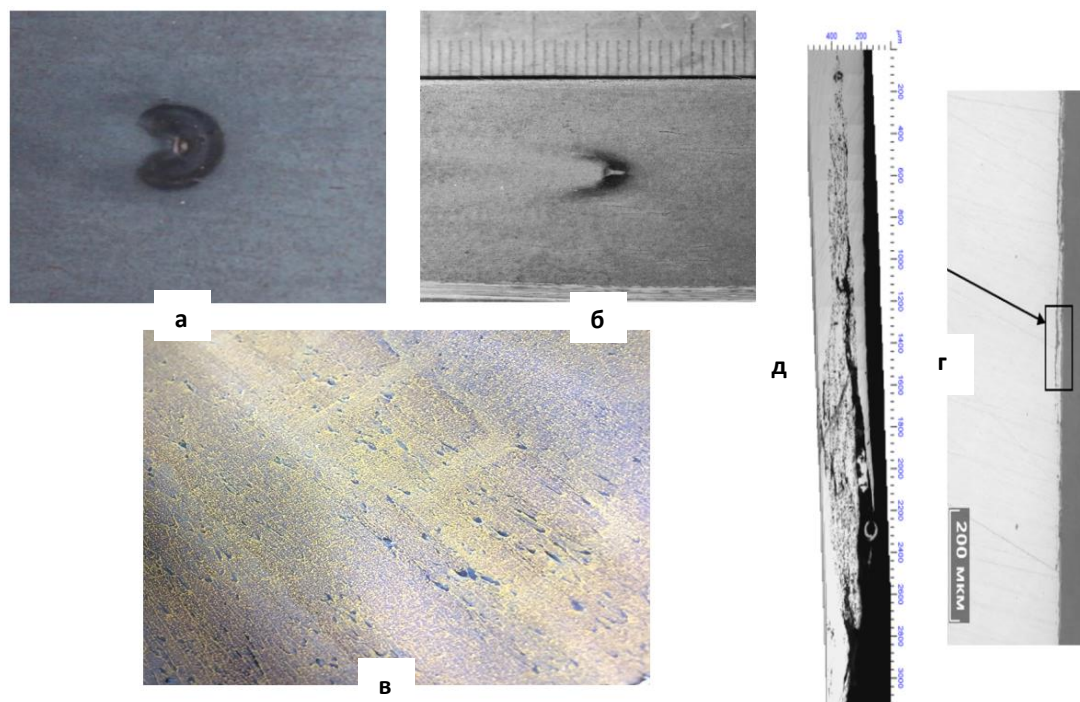


Рис. В.2 – Внешний вид дефекта плена «мелкая» (а, б, в) и микроструктура дефекта (г, д)

Таблица В.2 – Плена «мелкая»

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - вторичное окисление металла; - низкий уровень металла в промежуточном ковше; - захват шлаковой смеси в кристаллизаторе при нестабильной разливке; - колебания уровня металла в кристаллизаторе выше нормы 	<ul style="list-style-type: none"> - ослабление межкристаллитной прочности примесями цветных металлов, которые располагаются по границам зёрен и приводят к ухудшению горячей пластичности; - присутствие дефектов на поверхности сляба; - эрозия (размыв) огнеупоров; - неудовлетворительное качество ШОС для кристаллизатора (избыточная вязкость и основность (CaO/SiO₂) с формированием гарнисажа) 	<ul style="list-style-type: none"> - внедрение в производство элементов технологии «чистая сталь»; - исключить применение материалов, в которых содержатся примеси (Cu, Cr, Sn, Ni и др.), повышающие формирование трещин на слябе за исключением тех материалов, которые специально используются для легирования и обеспечения марочного содержания в стали 	<ul style="list-style-type: none"> - дефекты необходимо удалять путем шлифовки; - в отдельных случаях, не требуется доработка, из-за малого объёма дефекта и отсутствия влияния на конечный прокат 	<ul style="list-style-type: none"> - в отдельных случаях минимальное влияние на конечный прокат после зачистки или доработки металла; - трансформируются в мелкие плёны; - снижение механических свойств металла незначительное или отсутствует

В.3 Плена по следам качания. Тип плены № 2 из-за трещин на поверхности непрерывнолитого металла

Дефект поверхности обнаруживается визуально (рисунок В.3), расположен преимущественно на верхней стороне проката с периодичностью 100-450 мм в зависимости от толщины проката, характеристик оборудования УНРС (ход стола качания кристаллизатора, радиус УНРС, размеры и шаг расположения роликов). Период равен произведению суммарной вытяжки на величину периода следов качания кристаллизатора (хода движения кристаллизатора). Представляет собой группу несплошностей, вытянутых вдоль направления прокатки, с частичным отслоением металла языкообразной формы, образующихся при прокатке по месту растрескивания поверхности сляба (заготовки) по следам качания кристаллизатора. Глубокие складки или грубые следы качания кристаллизатора являются концентраторами напряжений, приводят к образованию поперечных трещин на поверхности сляба, которые трансформируются при прокатке в плену. Концентратом плены по следу качания выступают метки качания от кристаллизатора, остающиеся на поверхности непрерывнолитого металла, а также могут быть трещины, формирующиеся из-за неправильной работы оборудования. Сопутствующей причиной возникновения трещин на поверхности литого металла может быть присутствие по границам первичных аустенитных зёрен цветных примесей, склонных образовывать легкоплавкие эвтектики с железом и ослаблять межкристаллитную прочность при горячей прокатке. Грубые поперечные трещины могут являться предварительной ступенью для образования прорыва жидкого металла под кристаллизатором или в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) из-за процесса прилипания слитка к кристаллизатору во время разливки металла на УНРС.

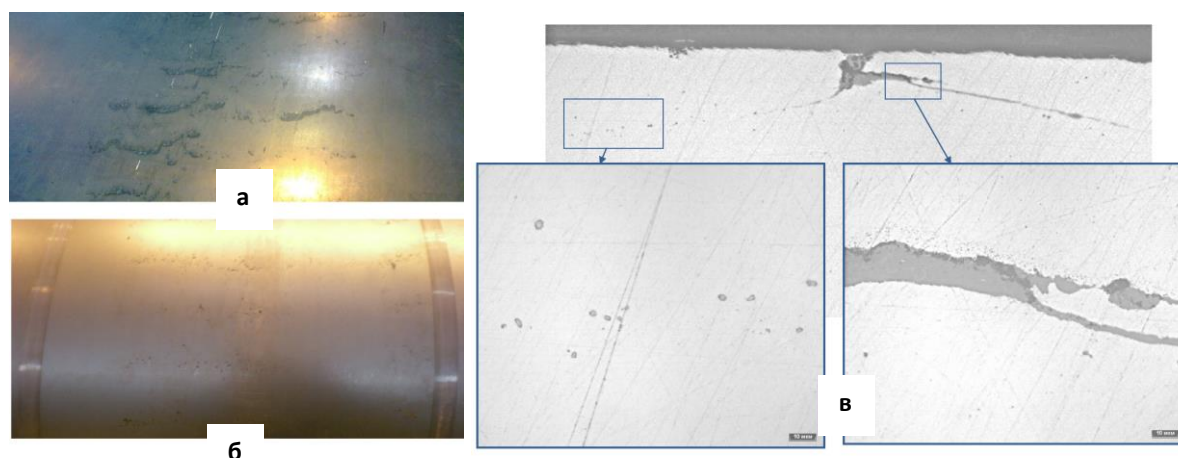


Рис. В.3 – Внешний вид плены по следам качания (а и б) и микроструктура дефекта (в)

Таблица В.3 – Плена по следам качания

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - выпрямление сляба в УНРС при температурах ниже горячей пластичности стали (температура определяется химическим составом стали; для стали 20 - интервале температур составляет 800-970 °С); - переохлаждение сляба в ЗВО (чрезмерное охлаждение); - наличие повышенного содержания примесей цветных металлов и прочих примесей (Cu, Cr, Sn, Ni, Mo, Pb); - неудовлетворительное состояние роликовой проводки ручья (центровка оборудования, ролики и форсунки); - производство [Al]X[N]X10000 более 2,0; - образование грубого следа качания, из-за большой амплитуды или увеличения времени опережения качания кристаллизатора на верхнюю границу (неверное соотношение между частотой качания и скоростью разливки УНРС); 	<ul style="list-style-type: none"> - повышенное содержание в металле оксидных неметаллических включений (общий кислород в металле более 30 ppm или содержание Al₂O₃ более 30 ppm); - углеродный эквивалент Seq – 0,15 мас. % (при значениях от 0,07 до 0,15 больше всего образуется трещин); - нарушения в работе механизма качания кристаллизатора; - активизация процессов вторичного окисления металла через поступления в металл кислорода из воздуха (через шиберные плиты, стык стакан-коллектор и защитная труба и др.) и шлака (замешивание оксида кремния SiO₂ из шлака с металлом, «кислая» теплоизолирующая смесь соприкасается с жидким металлом и др.); - снижение уровня металла или значительные колебания уровня металла вверх или вниз в промежуточном ковше, чрезмерная продувка расплава аргоном в промежуточном ковше с оголением зеркала металла; 	<ul style="list-style-type: none"> - внедрение в производство элементов технологии «чистая сталь»; - снизить интенсивность охлаждения сляба в зоне вторичного охлаждения; - исключить применение материалов, в которых содержатся примеси (Cu, Cr, Sn, Ni, Mo, Pb, Ti, Al, N), повышающие формирование трещин на слябе за исключением тех материалов, которые специально используются для легирования и обеспечения марочного содержания в стали; - повысить температуру нагрева сляба в туннельной печи перед прокаткой; - снизить производства [Al]X[N] или сдвинуть провал пластичности в сторону низких температур; - рекомендуется иметь содержание алюминия и азота в стали на нижнем марочном пределе; 	<ul style="list-style-type: none"> - дефекты необходимо удалять путем шлифовки; - в более серьезных случаях металл переводится в пониженное качество или бракуется 	<ul style="list-style-type: none"> - в отдельных случаях минимальное влияние на конечный прокат после зачистки или доработки металла; - трансформируются в грубые плёны; - снижение механических свойств металла

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительное качество ШОС для кристаллизатора (избыточная вязкость и основность (CaO/SiO₂) с формированием гарнисажа) или несоответствие ШОС разливаемой марки стали; - неравномерная смазка слитка шлаком в кристаллизаторе; - для литейно-прокатных комплексов с горячей прокаткой рулонов: низкая температура выгрузки сляба из печи перед черновой прокаткой (< 1050-1150 °С) 	<ul style="list-style-type: none"> - переохлаждение сляба при содержании в металле примеси оксидов титана (более 20 ppm) и микролегирование ниобием (Nb); - содержание титана и бора выше фонового содержания в металле (более 20 ppm и более 4 ppm соответственно) при условии, если ими металл не легировался; - бор при разливке может создавать эффект хрупкости в местах изгиба (следы качания) при низкой температуре поверхности сляба 	<ul style="list-style-type: none"> - контроль состояния роликовой проводки ручья, центровка оборудования, форсунок, зачистка и замена вышедших из строя элементов оборудования УНРС 	-	-

В.4 Прокатная плена. Тип плены № 3 из-за образования дефектов во время горячей стадии прокатки металла

Дефект поверхности обнаруживается визуально (рисунок В.4), представляющий собой отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки рванин, следов сильной выработки валков или грубых механических повреждений. Визуально прокатную плену практически невозможно отличить от плены, связанную со сталеплавильным производством, поэтому следует прибегать к металлографическим исследованиям природы дефекта. Сюда также можно отнести формирование дефекта из-за недостаточной очистки поверхности металла от окалины перед деформацией металла (не убрана окалина). Металлографические исследования для прокатной плены показывают наличие оксида железа без признаков внутреннего окисления (другие неметаллические включения не обнаруживаются, но могут присутствовать следы и скопления цветных примесей Cu, Cr, Sn, Ni, Mo, Pb). Металлографическим способом может быть выявлена окалина и не обнаружены следы внутреннего окисления как для плены № 2, так и химические элементы (неметаллические включения) для плены № 1, то есть дефект формируется на этапе горячей прокатки.

Таблица В.4 – Прокатная плена

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - неудовлетворительное состояние прокатного оборудования; - нарушение режимов прокатки 	<ul style="list-style-type: none"> - не осуществляется достаточная очистка непрерывнолитого металла или подката от окалины перед деформацией металла 	<ul style="list-style-type: none"> - соблюдения режимов прокатки; - своевременное обслуживание и ремонт прокатного оборудования; - мониторинг и контроль за оборудованием, сбивающим окалину перед черновым и чистовым прокатами 	<ul style="list-style-type: none"> - дефекты необходимо удалять путём вырубки; - в более серьезных случаях металл бракуется с переводом в лом 	<ul style="list-style-type: none"> - не допустимые дефекты поверхности в виде трещин, раскатов и плён

В.5 Пузырь-вздутие

Скрытый дефект обнаруживается в процессе деформации металла визуально или методами неразрушающего контроля. Дефект поверхности в виде локализованного вспучивания металла образуется на поверхности листа, ленты или под поверхностью на не большой глубине, из-за повышенного местного загрязнения металла газами или неметаллическими включениями (рисунок В.5). В поперечном сечении дефекта наблюдаются несплошности, параллельные поверхности проката, заполненные неметаллическими включениями. По месту дефекта наблюдается повышенная загрязненность металла неметаллическими включениями. Возможно науглероживание металла возле несплошностей, заполненными шлаковыми включениями.

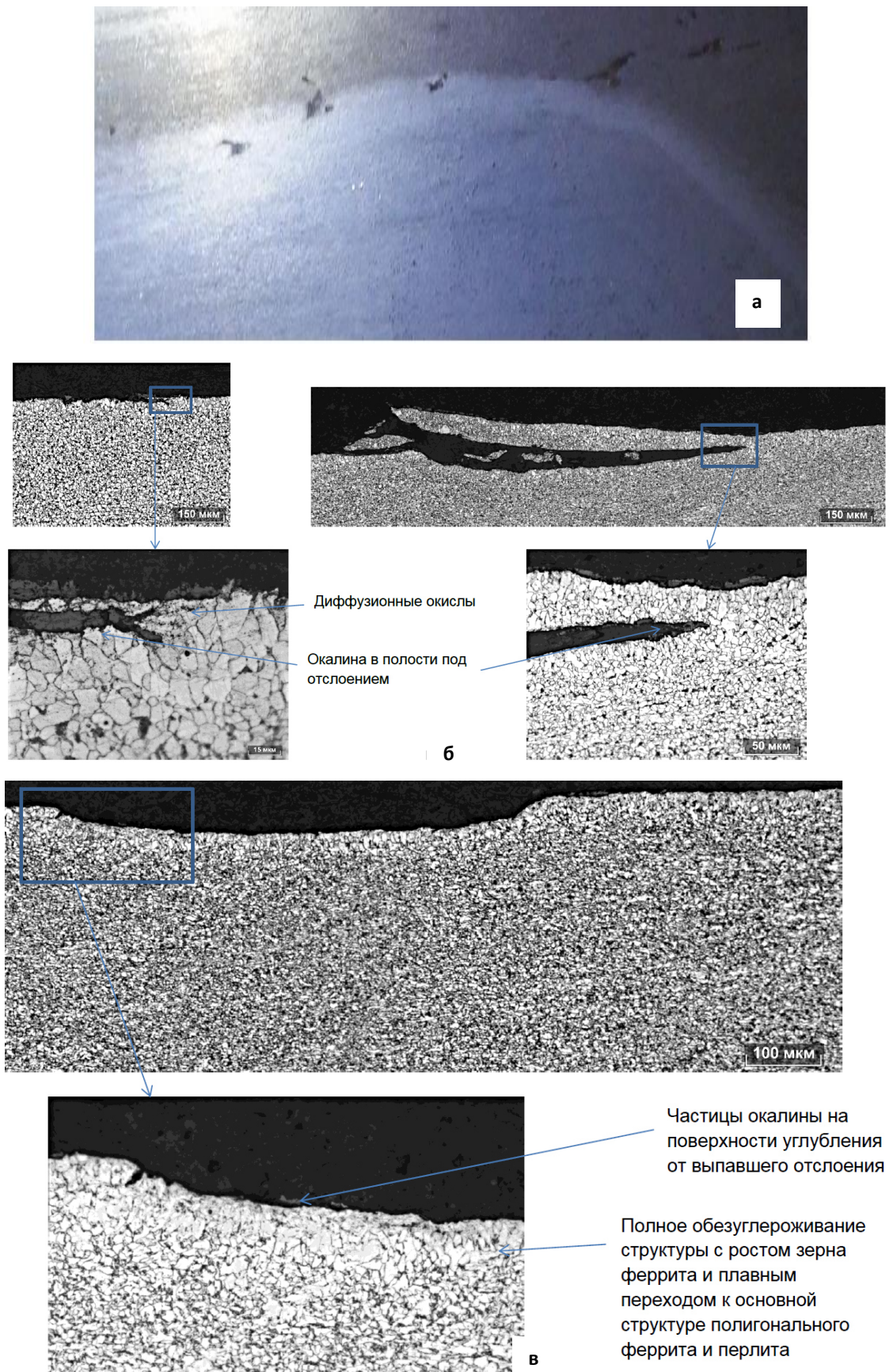


Рис. В.4 – Внешний вид дефекта «прокатная пленка» в прикормочной зоне (а) и микроструктура дефекта (б и в)

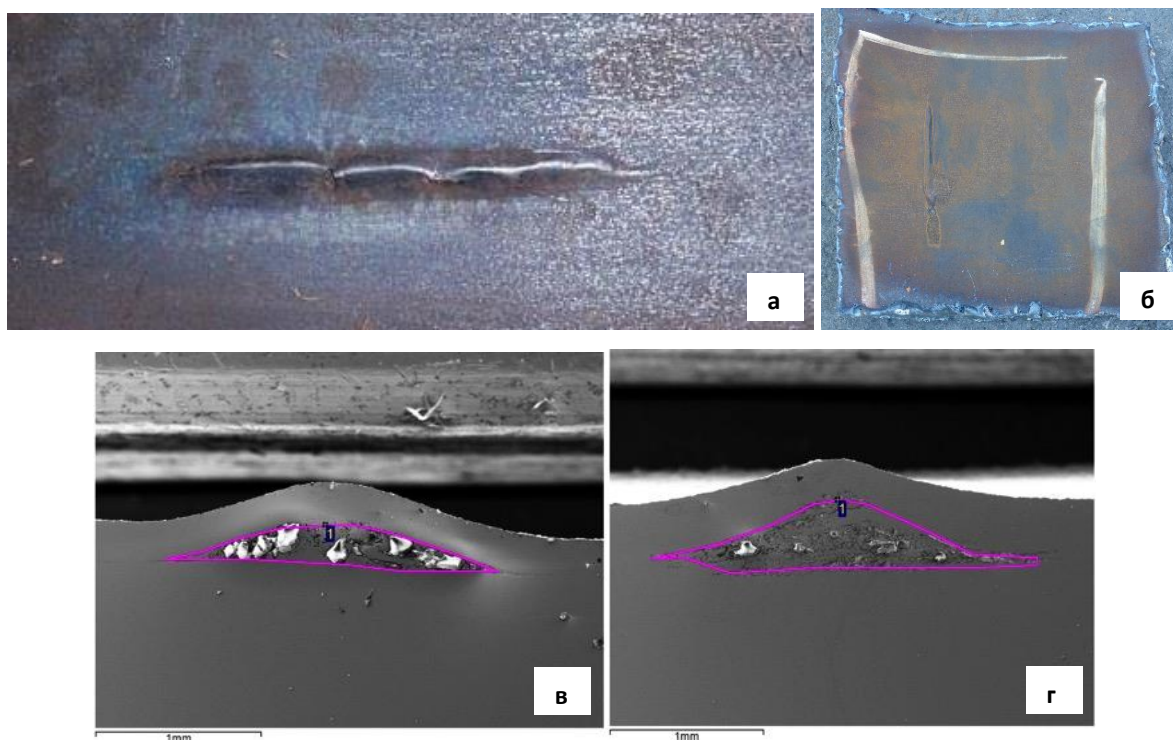


Рис. В.5 – Внешний вид дефекта пузырь-вздутие (а и б) и увеличенное на электронном микроскопе неметаллическое включение в дефекте (в и г)

Таблица В.5 – Пузырь-вздутие

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - повышенное содержание в металле неметаллических включений (общий кислород в металле более 30 ppm или содержание $Al_{окс}$ более 30 ppm); - разливка стали с повышенным содержанием высокоактивных элементов (Ti, Cr, Se, V и др.) 	<ul style="list-style-type: none"> - повышенное колебание уровня металла в кристаллизаторе (среднеквадратичное отклонение (STD) > 0,85) 	<ul style="list-style-type: none"> - внедрение в производство элементов технологии «чистая сталь»; - корректный подбор ШОС для кристаллизатора; - стабилизация уровня металла в кристаллизаторе и снижение его колебаний до уровня STD не более 0,85 (цель STD < 0,55); - для слябовых УНРС, где имеются нестабильные потоки металла в кристаллизаторе; - установка электромагнитного торможения в кристаллизаторе (ЭМТ-К); - подбор дизайна погружного стакана; - мероприятия по снижению процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше 	<ul style="list-style-type: none"> - дефектная часть вырезается; - при грубом дефекте металл бракуется с переводом в лом 	<ul style="list-style-type: none"> - не допустимый дефект для проката

В.6 Крупные кластерные неметаллические включения внутри металла

Крупные неметаллические включения внутри металла – это скрытый дефект, выявляющийся в металле только методами неразрушающего контроля УЗК (ультразвуковой контроль) или РТК (рентгеновский телевизионный контроль) и пр. Методом УЗК или РТК в металле обнаруживаются индикации по несплошности металла (неметаллические включения или ликвация) и далее производится изучение природы этой несплошности и установление возможных причин образования дефектов (рисунок В.6 и В.7).

Таблица В.6 – Крупные кластерные неметаллические включения внутри металла

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - источники магниевои шпинели: футеровка сталеразливочных и промежуточных ковшей, несовершенные шлаковые режимы в сталеразливочном и промежуточном ковшах; - причины образования нежелательных тугоплавких алюминатов кальция: неконтролируемые процессы вторичного окисления металла и несовершенная технология модифицирования металла кальцием; - источник образования сульфида кальция (CaS): это попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш УНРС или содержание серы в металле более 30 ppm 	<ul style="list-style-type: none"> - не соблюдения технологии производства «чистой стали» 	<ul style="list-style-type: none"> - внедрение в производство элементов технологии «чистая сталь»; - мероприятия по снижению процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше (применяемые шлаковые смеси для промежуточного ковша, внедрение защитной трубы, открывающейся под уровнем металла, подача аргона для инертизации и др.); - перейти на улучшенные огнеупорные материалы для промежуточного ковша (торкрет-масса, металлоприёмник и др.); - недопущение попадания ковшевого шлака в промежуточный ковш 	<ul style="list-style-type: none"> - дефектная часть вырезается; - в более серьезных случаях металл переводится в пониженное качество или бракуется 	<ul style="list-style-type: none"> - не допустимый дефект для ответственного проката; - не влияет на качество для рядового металла

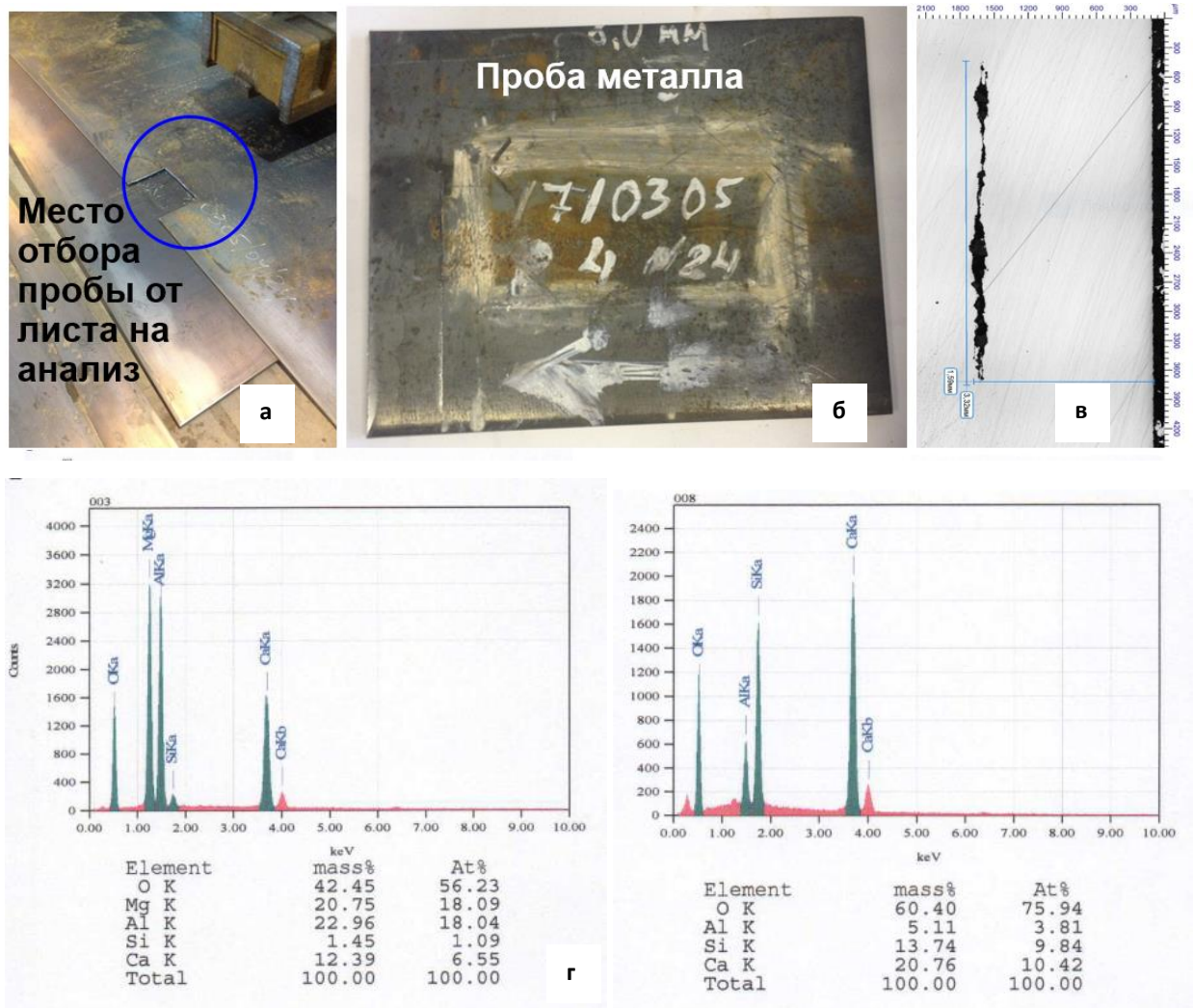


Рис. В.6 – Пример отбора пробы металла (а и б) для металлографических исследований методами оптической микроскопии (в) и микрорентгеноспектральным анализом с расшифровкой рентгенограмм (г); внутренний дефект представляет собой комплексное оксидное неметаллическое включение, в состав которого входят Al, Ca и Mg (магниева шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$ и алюминаты кальция: $CaO \cdot 6Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$ и $CaO \cdot Al_2O_3$)

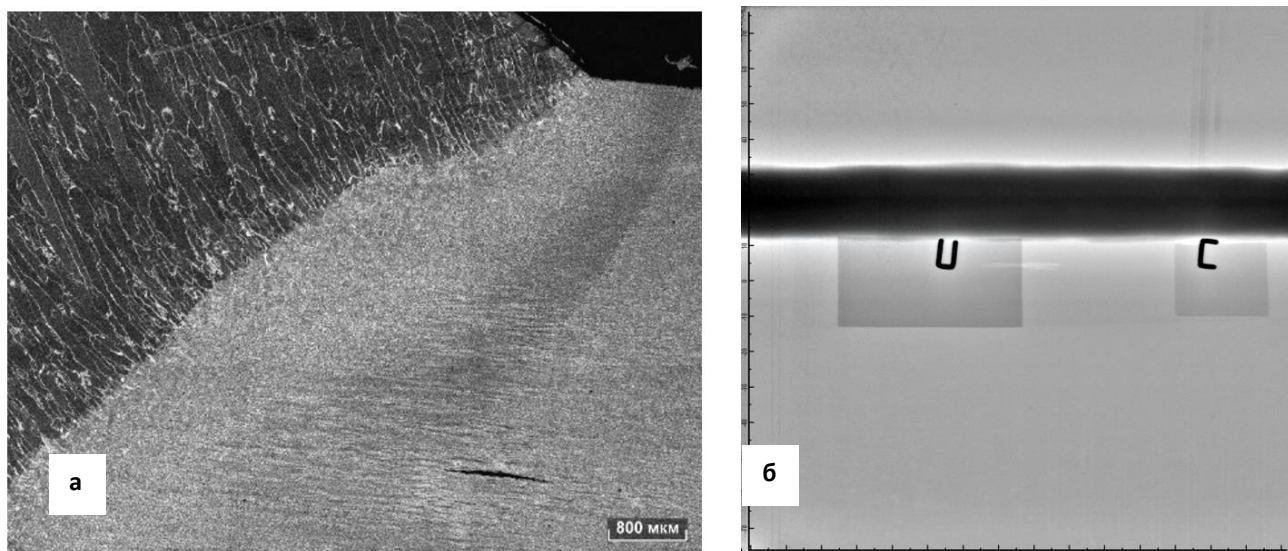


Рис. В.7 – Пример выявления крупных кластерных включений внутри металла: а) неметаллическое включение, обнаруженное методом УЗК и исследовано на электронном микроскопе; б) включение, обнаруженное методом РТК и исследовано на электронном микроскопе; металлографические исследования неметаллических включений в трубе показывают, что они состоят из магнезиевой шпинели ($MgO \cdot Al_2O_3$) и алюминатов кальция системы $CaO-Al_2O_3$ и сульфидов кальция (CaS)

В.8 Продольная трещина

Дефект поверхности обнаруживается визуально (рисунок В.8), представляет собой ориентированную вдоль направления прокатки, немного извилистую трещину с прикатанными краями в центральной части рулона, может сопровождаться мелкими языкообразными отслоениями и быть как сверху, так и снизу полосы (металлопроката). В поперечном сечении дефект имеет вид несплошности, которая может переходить в трещину. В зоне дефекта наблюдается значительное обезуглероживание с плавным переходом к нормальной структуре, которое сопровождается диффузионными окислами. Аномального характера течения металла, характерного для дефектов прокатного происхождения обычно не обнаруживается. В сечении внутренняя полость трещины может быть заполнена окалиной. По краям полости и разветвлений структура может быть насыщена мелкими глобулярными диффузи-

онными оксидами железа и другими элементами типа $\text{FeO}\cdot\text{MnO}$. Продольная трещина является предварительной ступенью для образования прорыва жидкого металла на УНРС.

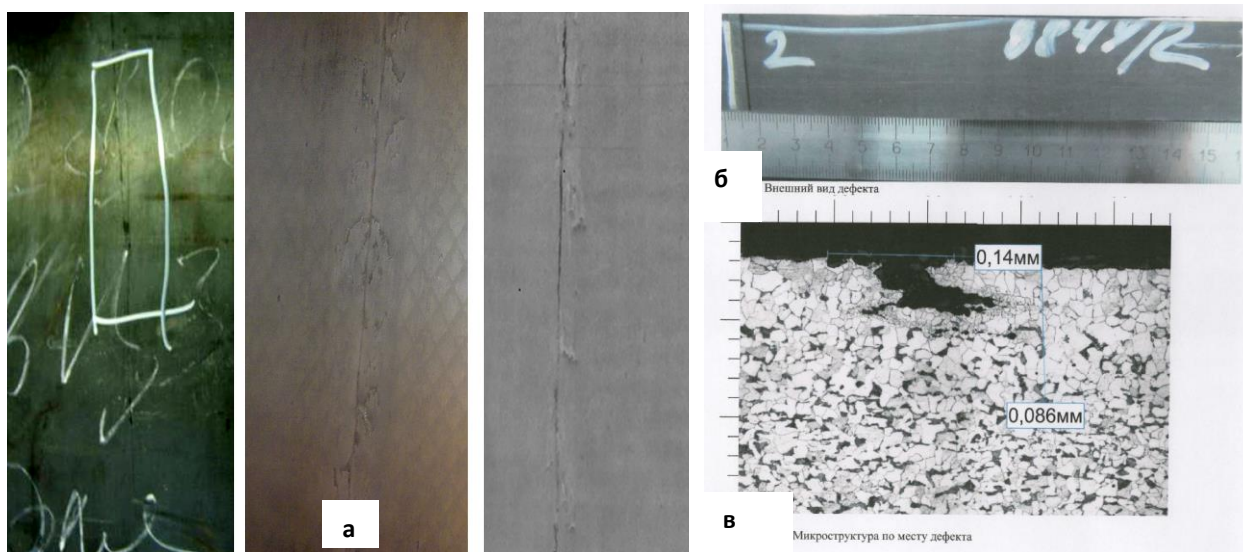


Рис. В.8 – Внешний вид продольного дефекта на металлопрокате (а и б) и микроструктура по месту дефекта (б)

Фундаментальные механизмы образования продольных трещин на непрерывнолитом металле были описаны многочисленными исследователями и металлургами в 70-90-х годах прошлого века [25, 29, 51, 59, 96]. Исходя из их работ были сформулированы следующие три причины возможного образования продольных трещин на слябе (Longitudinal surface cracks in continuously cast slabs):

- 1) Продольные трещины вызваны быстрым охлаждением в зоне мениска (влияние кристаллизатора);
- 2) Высокая концентрация серы и углерода (перитектическая трансформация) в комплексе с некорректным охлаждением слитка в зоне вторичного охлаждения (ЗВО);
- 3) Увеличение теплового потока на широкой плите кристаллизатора.

Механизм образования продольных трещин в кристаллизаторе

Трещина образуется, когда напряжения превышают сопротивление на разрыв для первичных зёрен в корочке слитка. Продольные трещины образуются в большей степени на широких сторонах сляба и ближе к центру в направлении разливки

и могут тянуться по всей длине сляба, при этом, прервавшись, они продолжают, как правило, с некоторым смещением в сторону в виде более коротких трещин. Любая неравномерность трения между корочкой слитка и плитой кристаллизатора опасна и она увеличивает локальные деформации – образуются трещины.

Таблица В.7 – Продольная трещина

Причины образования	Другие сопутствующие причины	Предлагаемые способы предупреждения	Обработка	Влияние на прокат
<ul style="list-style-type: none"> - повышенная теплопередача в кристаллизаторе выше критической из-за разливки на текущих плитах кристаллизатора, разливочного стакана и использования текущих ШОС для кристаллизатора с низкой основностью; - не соблюдения температурно-скоростного режима (слишком высокая скорость разливки); - слишком высокая температура стали в проковше (более 35 °С); - слишком интенсивное охлаждение кристаллизатора водой; - неудовлетворительное состояние роликовой проводки ручья (центровка оборудования, ролики и форсунки) 	<ul style="list-style-type: none"> - углеродный эквивалент Seq – 0,15 мас. % (при значениях от 0,07 до 0,15 больше всего образуется трещин); - повышение теплопередачи из-за снижения в металле оксидов и газов (азот < 80 ppm, кислород < 25 ppm, водород < 5 ppm – вакуумированный металл); - «смывы» неметаллических включений с поверхности стакана (изменяются физико-химические свойства ШОС в кристаллизаторе); - колебания уровня металла в кристаллизаторе выше нормы; - использование в работе широких плит с малой толщиной (изношенные плиты кристаллизатора или ошибки проектирования); - нестационарный режим разливки (1-ый сляб или заготовка, перековшовка, изменение ширины сляба, замена стакана и др.); - несовершенный дизайн разливочного погружного стакана УНРС; - неверная конусность кристаллизатора; - не качественный разливочный стакан (повышенный износ или разрушение огнеупора во время разливки металла) 	<ul style="list-style-type: none"> - замена кристаллизатора; - скорректировать температуру стали после внепечного агрегата; - снизить скорость разливки; - увеличить основность ШОС для кристаллизатора, но не выше точки формирования поперечных трещин или прилипания корочки металла к кристаллизатору (избыточная основность ШОС может привести к прорыву металла под кристаллизатором); - снизить расход воды на кристаллизатор; - контроль состояния роликовой проводки ручья, центровка оборудования, форсунок, зачистка и замена вышедших из строя элементов оборудования УНРС; - усилить мониторинг и контроль за ремонтами и ревизиями кристаллизаторов перед установкой на УНРС; - выполнение работ по подбору оптимального дизайна погружного стакана и стабилизации потоков металла в кристаллизаторе; - осуществлять корректировку химического состава стали с целью максимального удаления из перитектического диапазона ($0,15 \leq Seq$, мас. % $\leq 0,07$); - применение материала плит кристаллизатора с меньшей теплопроводностью чем у традиционных плит с серебром (Ag – 0,08-0,12 мас.%) 	<ul style="list-style-type: none"> - дефектная часть вырезается; - в более серьезных случаях металл переводится в пониженное качество или бракуется 	<ul style="list-style-type: none"> - не допустимый дефект

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Письма и акты об использовании результатов диссертационной работы

Г.1 Письмо АО «Выксунский металлургический завод»



**ВЫКСУНСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
ЗАВОД**

Акционерное общество
«Выксунский
металлургический
завод»

Россия, 607061, Нижегородская обл.,
г. Выкса, ул. Братьев Баташевых, д. 45
тел.: 8 800 250-11-50
факс: +7 (83177) 3-76-05
e-mail: vmz@vsw.ru
www.omk.ru

№ _____ от _____ 20__ г.
на № _____ от _____ 20__ г.

Руководителю направления
по технологии и качеству
ООО «Эколант» С.А. Ботникову

О внедрении результатов работы

Справка

Ботников Сергей Анатольевич принимал участие в разработке следующих нормативных документов, используемых при производстве металлопроката для производства труб в условиях Литейно-прокатного комплекса АО «Выксунский металлургический завод»:

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

С 2015 по 2017 года Ботников Сергей Анатольевич принимал непосредственное участие как руководитель и со-руководитель в реализации организационного проекта «Чистая сталь» (Этап 1 и Этап 2) в АО «Выксунский металлургический завод». Проект в целом был реализован и

критерии успеха выполнены, то есть достигнуты поставленные цели в установленные сроки и бюджет.

Результаты проведенной работы Ботниковым С.А. были применены в учебном процессе «Производство чистой стали в условиях Литейно-прокатного комплекса Выксунского металлургического завода».

Директор Инженерно-технологического центра

П.П. Степанов



В.В. Кислица
Тел. 8 (83177) 9-64-42

Г.2 Письмо АО «Первоуральский новотрубный завод»

Акционерное общество «Первоуральский новотрубный завод»

623100, Россия, Свердловская область, г. Первоуральск, ул. Торговая, 1
ОКПО 00186619, ОГРН 1026601503840, ИНН/КПП 6625004271/997450001

+7 3439 27 77 77
chelpipe.ru



П Н Т З

04.03.2021 № Ц51-173

Руководителю направления
по технологии и качеству
ООО «Эколант»
С.А. Ботникову

Р О внедрении результатов работы

Руководитель направления по технологии и качеству ООО «Эколант» Ботников Сергей Анатольевич является одним из разработчиков технических условий и других перечисленных ниже нормативных документов на производство непрерывнолитой заготовки для последующего производства высококачественных труб:

- ТУ 14-159-324-2016 «Заготовка трубная непрерывнолитая круглого сечения из углеродистых, низколегированных и легированных марок стали»;
- ТИ 159-СТ-11 Технологическая инструкция «Выплавка полупродукта в дуговой сталеплавильной печи»;
- ТИ 159-СТ-12 Технологическая инструкция «Внепечная обработка стали на установке ковш-печь»;
- ТИ 159-СТ-01 Технологическая инструкция «Внепечная обработка стали на установке вакуумирования»;
- ТИ 159-СТ-02 Технологическая инструкция «Разливка стали на машинах непрерывного литья заготовки».

С уважением,
начальник цеха
технического контроля №51



В.П. Турбар

Г.3 Благодарственное письмо АО «Выксунский металлургический завод»

**ВЫКСУНСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
ЗАВОД**

Благодарственное письмо

БОТНИКОВУ СЕРГЕЮ АНАТОЛЬЕВИЧУ

технологу цеха по стальному производству
выксунского филиала АО «ОМК-Сталь»

За высокий личный вклад в реализацию организационного проекта «Чистая сталь»
и повышение эффективности производства Литейно-прокатного комплекса

Управляющий директор АО «ВМЗ»

А.М. Барыков



ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Изобретение к патенту № 2740949



ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Перечень контролируемых параметров технологии производства «чистой стали» и «суперчистой стали»

Таблица Е.1 – Перечень контролируемых параметров технологии производства «чистой стали» и «суперчистой стали», а также их влияние на качество, производительность цеха и себестоимость стали

№	Ключевой технологический параметр	Целевые диапазоны или значения контроля *	Влияние на качество, производительность цеха и себестоимость стали
Раскисление полупродукта на выпуске плавки			
1	Усвоение кремния из ферросплавов на выпуске плавки	> 80 %	Себестоимость через расход ферросплавов; влияние на качество через изменение содержания оксида SiO ₂ в шлаке
2	Содержание общего алюминия [Al _{общ}] в первой пробе в сталеразливочном ковше	от 0,0050 до 0,0150 мас. %	Чистота стали по оксидам и стабильность внепечной обработки
Шлакообразование на выпуске плавки и во время внепечной обработки стали в сталеразливочном ковше			
3	Химический состав рафинировочного шлака в сталеразливочном ковше	Al ₂ O ₃ = 26...30 мас. %; CaO = 54...61 мас. %; SiO ₂ ≤ 10 мас. % (для кремния в металле > 0,30 мас. %); SiO ₂ ≤ 6 мас. % (для кремния в металле 0,15... 0,30 мас. %); SiO ₂ не более или равно 4 мас. % (для кремния в металле < 0,15 мас. %); MgO = 4,5...8,5 мас. %; ∑(FeO + MnO) ≤ 1,0 мас. %; TiO ₂ не более 0,15 (0,20) мас. % (для марок стали, где титан не добавляется)	Общая чистота стали по оксидам и сульфидам; себестоимость (снижение угара алюминия); стабильность внепечной обработки стали; стабильность разлива на УНРС; минимизация вспенивания шлака при вакуумировании в камерном вакууматоре
Отсечка сталеплавильного шлака на выпуске плавки			
4	Сумма (FeO) и (MnO) в первой пробе шлака в сталеразливочном ковше или в начале внепечной обработке на УКП	≤ 4,0 мас. %	Чистота стали по оксидам; лучшая производительность УНРС; стабильность внепечной обработки стали; снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
5	Прирост фосфора [P] в сталеразливочном ковше без учёта прихода фосфора из ферросплавов Δ[P] = [P] _{УНРС} – [P] _{УКП} [P] _{УКП} – содержание фосфора в первой пробе металла на внепечной обработке (после выпуска плавки)	≤ 20 ppm (≤ 0,0020 мас. %)	Чистота стали по оксидам, сульфидам и фосфору; стабильность внепечной обработки стали; лучшая разливаемость на УНРС; снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле

№	Ключевой технологический параметр	Целевые диапазоны или значения контроля *	Влияние на качество, производительность цеха и себестоимость стали
Продувка расплава инертным газом в сталеразливочном ковше			
6	Интенсивность продувки расплава инертным газом от момента времени ввода первой порции алюминия до последней на УКП	$\leq 2,5$ л/т·мин	Чистота стали по оксидам; себестоимость (снижение угара алюминия)
7	Интенсивность аргоновой продувки от момента ввода последней порции алюминия [Al] и ввода кальция [Ca]	$\leq 1,9$ л/т·мин	Чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС, снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
8	Интенсивность аргоновой продувки от момента ввода кальция до отключения продувки («очистительная» продувка)	$\leq 1,2$ л/т·мин	Чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС, снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
9	Продолжительность «очистительной» продувки расплава после ввода кальция (чем больше, тем чище металл по оксидам) $\Delta[\text{время}] = [\text{время}]_{\text{стопAr}} - [\text{время}]_{\text{Caпр}}$	≥ 8 минут	Чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС, снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
Вакуумирование стали			
10	Водород [H] в промежуточном ковше	$\leq 2,0$ ppm ($\leq 0,00020$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле; исключение аварийных ситуаций на УНРС («прилипание» слитка в кристаллизаторе); оптимальные физико-химические свойства высокоосновных ШОС (шлака) в кристаллизаторе
11	Мониторинг производства алюминия на азот в мас. % [Al]X[N]X10 ⁴ в промежуточном ковше УНРС	$\leq 2,0$	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле (преимущественно поперечных трещин)
Модифицирующая обработка неметаллических включений кальцием			
12	Продолжительность между отдачей алюминиевой и кальцийсодержащей проволоки $\Delta[\text{время}] = [\text{время}]_{\text{Caпр}} - [\text{время}]_{\text{Alпр}}$	≥ 12 минут	Чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС, снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
13	Отношение общего содержания кальция к алюминию общего в сталеразливочном и промежуточном ковшах (или кальций и алюминий не связанные с кислородом)	Сталеразливочный ковш: (CaO)/(Al _{окс}) = 0,80...1,40 или [Ca]/[Al] = 0,08...0,14 Промежуточный ковш УНРС: (CaO)/(Al _{окс}) = 0,60...1,00 или [Ca]/[Al] = 0,06...0,10	Чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС; снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле
Оценка защиты металла от вторичного окисления на УНРС			
14	Прирост кремния между пробами сталеразливочного и промежуточного ковшей $\Delta[\text{Si}] = [\text{Si}]_{\text{УНРС}} - [\text{Si}]_{\text{послед. выпеч.}}$	≤ 50 ppm ($\leq 0,0050$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле; чистота стали по оксидам; снижение угара алюминия
15	Потеря алюминия между пробами промежуточного и сталеразливочного ковшей $\Delta[\text{Al}] = [\text{Al}]_{\text{послед. выпеч.}} - [\text{Al}]_{\text{УНРС}}$	≤ 60 ppm ($\leq 0,0060$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле, чистота стали по оксидам, оптимальные физико-химические свойства высокоосновных ШОС в кристаллизаторе
16	Мониторинг прироста азота в промежуточном ковше $\Delta[\text{N}] = [\text{N}]_{\text{УНРС}} - [\text{N}]_{\text{послед. выпеч.}}$	$\leq 5,0$ ppm ($\leq 0,00050$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле; чистота стали по оксидам; лучшая разливаемость на УНРС; оптимальные физико-химические свойства высокоосновных ШОС в кристаллизаторе

№	Ключевой технологический параметр	Целевые диапазоны или значения контроля *	Влияние на качество, производительность цеха и себестоимость стали
Косвенный контроль разливаемости стали на УНРС			
17	Оценка изменения позиции стопора во время разливки	Исключения случаев подъема стопора «вверх» (тугоплавкие включения) или «вниз» – повышенное содержание Са или низкое качество огнеупоров и стопорной пары (стакан-дозатора и «яблоко» стопора)	Снижение поверхностных и внутренних дефектов в непрерывнолите металле
18	Среднеквадратичное отклонение (STD) уровня металла в кристаллизаторе	$STD \leq 0,60$	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолите металле
Организация технологического процесса по технологии «плавка на плавку»			
19	Требуемая температура стали перед подъёмом сталеразливочного ковша на УНРС	отклонение не более минус 2°C и не более плюс 3°C	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолите металле; положительное комплексное влияние на качество непрерывнолитого металла
20	Продолжительность между отключением продувки аргоном в сталеразливочном ковше на внепечной обработке стали и моментом прибытия ковша на подъемно-поворотный стенд УНРС $\Delta[\text{время}] = [\text{время}]_{\text{УНРС}} - [\text{время}]_{\text{стопАр}}$	≤ 12 минут	Стабильность технологии «плавка на плавку»; увеличение производительности УНРС; положительное комплексное влияние на качество металла
21	Уровень металла в промежуточном ковше УНРС (не допущение снижения уровня металла в промежуточном ковше)	≤ 25 % от установленного рабочего уровня	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолите металле; чистота стали по оксидам
Организация работ со сталеразливочными ковшами			
22	Факт прожигания шибера сталеразливочного ковша кислородом	Фиксирование факта прожигания шибера кислородом	Увеличение неметаллических включений
23	Учёт теплового состояния футеровки и стойкости элементов огнеупоров каждого сталеразливочного ковша в режиме реального времени	Количество плавов для шлакового пояса и зоны стали; состояние продувочных фурм и шиберных плит; задержки и простои, ремонты; очистка шлакового пояса от корки; фактическая температура футеровки ковша (800-1200 °C)	Увеличение производительности для всего цеха; снижение себестоимости (стабилизация расхода огнеупоров); увеличение качества металла (увеличение процента открытия шибера без кислорода)
Чистота применяемых материалов по вредным примесям			
24	Рост титана [Ti] в пробах металла и шлака из сталеразливочного ковша (для марок стали, где не осуществляется легирование титаном)	≤ 15 ppm ($\leq 0,0015$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолите металле
25	Мониторинг прироста серы в промежуточном ковше УНРС (процесс резульфурация) $\Delta[S] = [S]_{\text{УНРС}} - [S]_{\text{послед. внепеч}}$	$\leq 2,0$ ppm ($\leq 0,00020$ мас. %)	Снижение поверхностных дефектов на непрерывнолите металле; чистота стали по сульфидам

* представленные граничные показатели не являются окончательными и могут быть скорректированы исходя из конкретных условий производства в сталеплавильном цехе