

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,

доктор технических наук

В.В. Орлов



«28» 03 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ботникова Сергея Анатольевича
«Разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

В диссертационный совет 24.2.437.01 на базе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, изложена на 438 страницах машинописного текста, включающего 80 рисунков, 45 таблиц, список использованных литературных источников из 442 наименований отечественных и зарубежных авторов, 8 приложений.

Актуальность темы исследования

В настоящее время все более востребована сталь с низким содержанием оксидных и сульфидных неметаллических включений, а также на отдельных марках стали имеются ограничения по содержанию в ней азота, водорода и фосфора. Такие требования выставляет прежде всего потребитель металла для производства соответствующей высококачественной металлопродукции. Также возникают проблемы с дополнительным окислением металла при выпуске и разливке. В этой связи диссертационная работа Ботникова С.А., которая посвящена разработке комплексной технологии получения стали высокой чистоты по неметаллическим включениям, примесям и газам в условиях современных сталеплавильных цехов с учётом всей технологической цепочки является весьма актуальной.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность и освещена степень разработанности тематики исследования, сформулированы цель и задачи работы, перечислены автором полученные результаты и их реализация, раскрыта их научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту. Также приведены сведения об апробации результатов работы, методы исследования, используемые для решения поставленных задач.

В первой главе «Состояние технологии современного производства высококачественных сталей с низкой концентрацией включений, примесей и газов» представлен аналитический обзор литературы по проблеме неметаллических включений в стали и их влияние на её качество. Было рассмотрено комплексное влияние на содержание в стали включений с учётом применяемых технологий и используемых материалов в сталеплавильном производстве. Отдельно рассмотрено влияние огнеупоров на неметаллические включения, а также преимущества и недостатки огнеупорных основ для ковшей и их применимость в металлургии. Широкий обзор литературных источников с

1930 г. по настоящее время позволил автору диссертации сформулировать цель и решаемые задачи, которые были отражены во введении.

Вторая глава «Вычислительная термодинамика и цифровизация для разработки технологии производства чистых сталей» посвящена развитию и применению вычислительной термодинамики и цифровых технологий для пирометаллургических процессов и разработки комплексной технологии производства высококачественной стали. Рассмотрен обзор вычислительной термодинамики и мировые программы для пирометаллургических процессов, такие как ГИББС (Россия), ИВТАНТЕРМО (Россия), ТЕРРА (Россия), пакет MPE (Австралия), MTDATA (Великобритания), Thermo-Calc (Швеция), FactSage (Канада и Германия). Автор диссертационной работы является соавтором программного комплекса SyTherMa-равновесие (STM) - получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669194.

Представлено, что в качестве основной научной идеи созданного комплекса (программа STM) эффективно работает положение о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ» и контроле внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Эта идея обеспечивает быстрый поиск критических точек нежелательного окисления стали в разрабатываемых и действующих технологиях.

Представлен пример разработки прогнозной модели температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах с применением методов углублённой аналитики и машинного обучения. Для повышения точности прогноза, кроме традиционной статистики, было предложено учитывать влияние стойкости огнеупоров сталеразливочного ковша и физико-химических свойств шлака. Уровень точности прогнозирования температуры металла в промежуточном ковше на первом этапе работы достиг 6,0 °С, а на втором – 5,4 °С.

В третьей главе «Анализ комплекса мероприятий производства высококачественной стали» описана вся технологическая цепочка в сталеплавильном цехе, которая охватывает такие процессы как раскисление, легирование, шлакообразование, нагрев и охлаждение расплава, перемешивание расплава аргоном, модифицирование неметаллических включений кальцием для раскисленной алюминием стали, а также приведены шесть вычислительных экспериментов в программе STM.

В работе расчётным методом установлено, что поступление кислорода извне по технологической цепочке может составлять для этапа: выпуска плавки от 0,88 до 5,50 кг/т; внепечной обработки стали – от 0,1 до 4,5 кг/т; участок разлива «промежуточный ковш» – от 0,005 до 0,100 кг/т; участок разлива «кристаллизатор» – от 0,001 до 0,080 кг/т.

Также в этой главе были: рассмотрены прорывы на установке непрерывной разлива стали (УНРС) из-за высокого содержания неметаллических включений в стали; показаны пути повышения уровня технологии по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей; выбраны параметры разделения природы образования металлургических дефектов.

В последних параграфах представлен поиск и подтверждения значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов из-за неметаллических включений с применением методов углублённой аналитики и машинного обучения на двух примерах: 1 – производство тонкого сляба толщиной 90,5 мм; 2 – производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок (диаметр от 145 до 600 мм).

В четвертой главе «Исследование механизма влияния содержания в металле вредных примесей, включений и газов на свойства ШОС в кристаллизаторе» исследованы технологические свойства шлака в кристаллизаторе для разлива на УНРС чистых сталей. В ходе работы было установлено, что для чистых сталей с низким

содержанием включений и газов характерны продольные трещины на поверхности непрерывнолитого металла, а для стали с повышенным содержанием включений и газов – поперечные трещины. Экспериментально было определено, что влияние шлакообразующей смеси (ШОС) на теплопередачу от слитка к кристаллизатору составляет 6 – 14 %, а конструкция кристаллизатора до 4 %. Также были установлены дополнительные значимые технологические параметры производства чистых сталей, которые значительно изменяют содержание включений и качество поверхности металла – это вязкость и основность ШОС для кристаллизатора. В параграфе 4.4 представлен разработанный алгоритм подбора ШОС кристаллизатора для осуществления разливки чистых сталей на УНРС.

Представленный в этой главе разработанный комплекс технологических мероприятий производства чистых сталей для всей технологической цепочки обеспечивает стабильный и достаточно высокий выход годной продукции, вследствие исключения невоспроизводимых результатов по качеству стали, то есть поверхностных и внутренних сталеплавильных дефектов в металле из-за неметаллических включений и газов.

В пятой главе «Разработка классификации чистоты стали» представлен литературный обзор влияния содержания в металле общего кислорода, азота, водорода, серы и фосфора на чистоту стали и качество металлопродукции. В параграфе 5.2 приведен разработанный дифференцированный подход к требованиям технологии производства чистых сталей и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства. Для действующих сталеплавильных цехов, в случае необходимости производить «чистую сталь», автор диссертации обращает внимание на технологические возможности оборудования, выстроенную логистику и «узкие места», которые могут критично сказываться на качестве выпускаемой стали по содержанию неметаллических включений и газов.

Введен новый термин классификация чистоты стали – «суперчистая» сталь. Данная сталь чище в 3 раза «чистой» стали по Гуляеву А.П. В работе представлено, что «суперчистую» сталь возможно получить путём раскисления её алюминием.

В шестой главе «Разработка алгоритма корректировки технологии производства чистых сталей» рассмотрены всевозможные производственные потери из-за неметаллических включений, представлен новый метод мониторинга и контроля производства чистых сталей в сталеплавильном производстве, описан комплекс технологических мероприятий производства высококачественной стали с низким содержанием включений и внедренный алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей на базе комплексного учёта повышенных требований к производству.

Алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей состоит из двух блоков, который охватывает всю технологическую цепочку от выплавки до разливки стали. Также рассмотрена схема поиска оптимума в свойствах ШОС кристаллизатора (трение и теплоперенос) для разливки «суперчистой стали» на УНРС с минимальным количеством дефектов на металле и аварийных ситуаций во время разливки.

В заключении диссертационного исследования представлено, что выполненная работа позволила существенно снизить расходы материальных и энергетических ресурсов и решить важную народно-хозяйственную проблему повышения эффективности деятельности металлургических предприятий, производящих высококачественную сталь для машиностроения, энергетики, транспорта и др.

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

В Приложениях приведены исходные данные шести вычислительных экспериментов в программе SyTherMa, энергетические параметры системы Fe–Mg–Ca–

Al–Mn–C–O для ПРКМ, результаты количественной оценки фазового состава тугоплавких отложений от разливочных стаканов УНРС, письма и акты об использовании результатов работы, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, патент, перечень контролируемых параметров технологии производства чистых сталей и составляющие экономического эффекта по результатам реализации проекта «Чистая сталь».

Научная новизна

1) Получило дальнейшее развитие возможности уникального аппаратно-программного комплекса, в том числе, созданные программные продукты на основе искусственного интеллекта, позволяющие разрабатывать инновационные технологии производства чистых и сверхчистых сталей, обеспечивать их стабильное и эффективное функционирование в условиях реального современного сталеплавильного производства. Благодаря комплексному рассмотрению системы «металл-шлак-газ» обеспечивается быстрое определение критических точек в разрабатываемых и действующих технологиях, определяются эффективные способы решения возникающих проблем качества чистых и сверхчистых сталей.

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

3) Посредством применения комплексного подхода к учёту поступления кислорода извне от всех возможных источников, уточнён вклад огнеупорного материала промежуточного ковша и его физико-химических свойств в процессе общего вторичного окисления расплава при производстве высококачественной стали, раскисленной алюминием, что обеспечивает перспективу развития технологий получения сталей со сверхнизким содержанием включений.

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

Практическая значимость результатов работы

1) Практическая ценность работы заключается в том, что её можно использовать для создания современного подхода в разработке и внедрении технологии производства чистых сталей в условиях действующего сталеплавильного производства.

2) Решена научно-техническая проблема реализации алгоритма корректировки технологических режимов производства чистых сталей, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле выбранных параметров на всей технологической цепочке.

3) Разработанные в работе рекомендации по технологии раскисления, являются основой производства высококачественной металлопродукции.

4) На основании выполненной диссертационной работы применена методика поиска и оценки критических зон в технологии поступления излишков кислорода, которая может видоизменяться и дорабатываться в будущем, что позволит расширить и развить как известные, так и дополненные данной работой подходы производства чистых сталей.

5) С позиции мероприятий, направленных на повышение чистоты стали по оксидным неметаллическим включениям, могут снизить и исключить случаи попадания тугоплавки неметаллических включений с внутренней поверхности разливочного стакана промежуточного ковша в заготовку или сляб, а также являются базой комплекса мероприятий производства чистых сталей.

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

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

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

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается большим объёмом выполненных экспериментов, как на промышленных плавках в условиях действующего сталеплавильного производства, так и с использованием термодинамических и математических расчётов, а также были использованы высокоточные и современные металлографическими исследованиями природы образования дефектов, количественной оценки фазового состава неметаллических включений в пробах металла и в виде отложений на разливочных стаканах УНРС.

Рекомендации по использованию результатов

Установленные в диссертационной работе зависимости поступления кислорода в расплав из воздуха, шлака, футеровки и материалов, позволили разработать и защитить патентом способ производства «суперчистой стали» (патент RU2740949), обеспечивающей получение стали с низким содержанием неметаллических включений размером менее 20 мкм, а также обеспечить стабильный и достаточно высокий выход годной продукции без поверхностных и внутренних сталеплавильных дефектов в металлопрокате.

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для всех производственных предприятий, занимающихся разработкой и совершенствованием получения высококачественных раскисленных алюминием сталей, среди которых следует отметить не только трубные компании, но и крупные металлургические российские комбинаты: НЛМК, Северсталь, Уральская Сталь, НТМК, ЧМК (Мечел) и др. Также результаты работы Ботникова С.А. могут быть использованы при производстве ответственной металлопродукции в сталеплавильных цехах машиностроительных заводов, в частности при производстве крупных слитков для атомной и конвенциональной энергетики.

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

Публикации по теме диссертации

Основные положения работы доложены и обсуждены на научных и научно-практических конференциях различного уровня. Всего по материалам диссертации опубликовано 51 печатная работа, в числе которых 16 в изданиях из Перечня ВАК, 10 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, одна монография, один патент на изобретение и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие содержание автореферата содержанию диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Личное участие соискателя заключается в определении общей стратегии и структуре работы, цели работы и постановке задачи исследования, разработке методик, организации и проведении исследований, непосредственное участие в получении экспериментальных данных и проведения теоретических расчетов по раскислению, легированию и шлакообразованию в сталеразливочном ковше, расчёты оценки вторичного окисления металла и другие расчёты. Автору принадлежит анализ и интерпретация результатов, формулировка научных основ разработки комплексной технологии производства чистых сталей, основных положений и выводов. Автором диссертации запатентован новый термин «суперчистая сталь». Творческим вкладом в развитие термодинамического модуля программного комплекса STM является промышленное опробование, настройка вычислений и организация работы по внесению в базу данных программы новых материалов, которые были перепроверены в сертифицированных лабораториях.

Специальность, которой соответствует диссертация. Материал диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов» по следующим пунктам:

- п. 2 – Твёрдое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных и смешанных систем;
- п. 4 – Термодинамика и кинетика металлургических процессов;
- п. 11 – Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов;
- п. 13 – Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах;
- п. 14 – Кристаллизация расплавов и методы воздействия на затвердевание;
- п. 15 – Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья;
- п. 17 – Пирометаллургические процессы и агрегаты;
- п. 18 – Электро- и спецэлектрометаллургические процессы;
- п. 21 – Внепечная обработка металлов;
- п. 22 – Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки;
- п. 25 – Производство особо чистых металлов и сплавов;
- п. 26 – Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирование техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1) Недостаточно полно представлена методика расчета по оценке поступления кислорода извне в металл по всему технологическому маршруту.

2) Следовало бы просить автора представить данные по верификации расчетов STM с производственными данными. Следует нанести фактические данные на графики с расчётами.

3) В работе не представлены критерии выбора ШОС для кристаллизатора.

4) Представляется важным, чтобы автор уточнил какое отношение $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ или Ca/Al является наиболее действенным и актуальным, для каких марок/групп сталей.

5) В качестве вопроса, представляется удивительным заявление автора о том, что при увеличении водорода в металле количество трещин на тонком слябе уменьшается.

6) В работе, к сожалению, автор не дал рекомендаций по применению своей методики для других производств, в частности при производстве высоколегированных сталей, крупных слитков и т.д.

Несмотря на высказанные замечания, не снижает высокой актуальности и злободневности и научной значимости проведенной работы, можно сформулировать следующее положительное заключение по диссертации.

Заключение

Диссертационная работа «Разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов» по своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, степени достоверности результатов является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемым п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в ред. от 01.10.2018 г. с изм. от 26.05.2020 г. «О порядке присуждения учёных степеней»). Работа Ботникова С.А. решает важные научные задачи, оптимизацию технологии раскисления широко распространенных сталей, а также экономическую задачу получения конкурентной высококачественной продукции.

Автор диссертации, Ботников Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Диссертационная работа, автореферат и отзыв рассмотрены и одобрены на расширенном научно-техническом совете ИМиМ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», протокол НТС № 4 от 21.03.2024 г. Присутствовало 23 члена совета из 35. Итоги голосования: за – 23, против – 0, воздержалось – 0.

Председатель НТС ИМиМ
АО «НПО «ЦНИИТМАШ»,
д.т.н., проф., лауреат ГП СССР,
премии Правительства РФ



В.С. Дуб

Ученый секретарь НТС ИМиМ



М.С. Соловьева

Акционерное общество «Научно производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)
115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4.
Тел. +7 (495) 675-83-02, факс: +7 (495) 674-21-96
e-mail: cniitmash@cniitmash.com