

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента,
заведующего кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой,
заместителя директора по науке и инновациям СТИ НИТУ «МИСИС»

Кожухова Алексея Александровича

на диссертационную работу Ботникова Сергея Анатольевича

«Разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов», представленной

на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности

2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность работы. Повышение качества ряда марок стали по оксидным и сульфидным неметаллическим включениям в условиях современного сталеплавильного производства сегодня является одной из актуальных задач, стоящих как перед отечественной, так и мировой металлургией. В представленной диссертации решение этой актуальной задачи носит комплексный подход, заключающийся в разработке, внедрении и обеспечении положительного результата по получению стали высокой чистоты с учётом всей технологической цепочки.

При получении ряда марок стали высокой чистоты традиционными являются проблемы получения стали с низким содержанием включений, так как повышенное их содержание может приводить к снижению эксплуатационных свойств получаемой металлопродукции, проблемам разлива металла на УНРС и возникновению нештатных ситуаций на производстве, например, загибания разливочных стаканов или прорывы кристаллизующейся корочки металла. Все это говорит о необходимости создания такой технологии в сталеплавильном цехе, которая позволила бы решать указанные проблемы с учетом доступных и новых технологий, а также проводить исследования и решать оптимизационные задачи на действующем производстве. Перспективным направлением решения поставленной задачи является применение традиционных и новых методов исследования в получении стали с низким содержанием включений. Например, важны не только отдельные технологические решения, но и комплексный контроль поступления кислорода из всех источников в металл: воздух, материалы, шлак и огнеупоры.

В связи с этим **актуальность** представленной диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что:

1. Получило дальнейшее развитие возможности уникального аппаратно-программного комплекса (SyTherMa-равновесие или сокращено – STM), в том

числе, созданные программные продукты на основе искусственного интеллекта, позволяющие разрабатывать инновационные технологии производства чистых и сверхчистых сталей ряда марок, обеспечивать их стабильное и эффективное функционирование в условиях реального современного сталеплавильного производства. Представлена основная научная идея о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ», при контроле внешнего поступления кислорода извне в металл. Это позволило быстро находить критические точки окисления в разрабатываемых и действующих технологиях для эффективных способов решения возникающих проблем качества чистых 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 Российской Федерации), содержащей в сумме менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа (масс. %): $[O]_{\text{общий}} \leq 0,00150 \%$, $[S] \leq 0,00150 \%$, $[H] \leq 0,00015 \%$, $[N] \leq 0,00500 \%$, $[P] \leq 0,00800 \%$. «Суперчистая сталь» в 3 раза чище «чистой стали» по Гуляеву А.П.

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

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

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

Практическая значимость работы заключается в применение новых технологических решений при производстве сверхчистых сталей позволяющие существенно снизить трудоёмкость и повысить технико-экономические показатели на металлургических предприятиях, производящих высококачественную сталь.

1. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проектировании сталеплавильных цехов, а также учтены при разработке базовой автоматизации цеха для производства высококачественной стали.

2. Представлен новый путь применения комбинации углубленного анализа данных и традиционных методов исследований в металлургическом производстве для выявления значимых технологических параметров для контроля технологии и разработки эффективных мероприятий.

3. По результатам всего организационного проекта «чистая сталь» в АО «Выксунский металлургический завод» за 21 месяц был получен существенный экономический эффект 269,1 млн. рублей: снижение брака в трубных цеха – 161,1 млн. рублей, экономия ферросплавов и раскислителей – 101,5 млн. рублей и снижение потери металла на УНРС – 6,5 млн. рублей.

4. Снижено удельное число прорывов на УНРС в 3,5 раза.

5. По результатам работы создания и внедрения математической модели прогноза температуры стали на принципах алгоритма машинного обучения было достигнуто снижение в 4,6 раза случаев разливки слябов с отклонениями от целевого диапазона по перегреву (15-30 °С).

Соответствующие акты и письма предприятий приведены в приложении диссертации, а также новизна технических решений, имеющих практическое значение, подтверждена патентом на изобретение.

Достоверность теоретических положений диссертации подтверждается большим объёмом выполненных экспериментов, большим количеством экспериментальных и промышленных плавок, достаточным объёмом теоретических, производственных и опытных данных, 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.

Анализ содержания диссертации, её завершенности

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал работы изложен на 438 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков и 45 таблиц, список литературы включает 442 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, личный вклад и сведения об апробации работы.

В главе 1 приведен литературный анализ по теме исследования, рассмотрены современные представления о чистоте стали, влияние оксидов, сульфидов или их комбинаций на свойства высококачественных сталей, методы снижения этих включений в стали и в сталеплавильном производстве, применяемые технологии на предприятиях для улучшения эксплуатационных свойств металлопродукции. Приведены достижения в области получения чистых сталей в России и за рубежом. Показаны преимущества и недостатки основных мероприятий для производства чистых сталей. Сформулированы задачи исследования.

В главе 2 представлен обзор вычислительной термодинамики и её применимости для металлургии, а также программы для пирометаллургических процессов. Представлен развитый автором термодинамический модуль SyTherMa-равновесие или STM, который был применен в работе автором диссертации. Программа STM 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.

В диссертационной работе расчёт коэффициентов активности металла в программе STM проводился с использованием параметров взаимодействия Вагнера, а расчёт коэффициентов активности шлака – по теории регулярных ионных растворов В.А. Кожеурова (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).

Рассмотрены методы углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных», по которым была разработана математическая модель прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах. В окончательном варианте наилучшее качество показала модель, построенная по алгоритму «градиентный бустинг». Автором диссертации в этой главе было установлено, что не применимы классические подходы корректировки и совершенствования технологии чистых сталей 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/комбинации, например, термодинамику совместно с углубленной аналитикой, статистику с экспертными знаниями и машинным обучением и пр.

В главе 3 описан комплекс мероприятий производства высококачественной стали. В основу разработки технологии производства чистых сталей вошли шесть вычислительных экспериментов (STM расчёты): 1 – оценка поступления кислорода извне в металл по всей технологической цепочке; 2 – выпуск плавки из сталеплавильного агрегата; 3 – оптимизация химического состава шлака в сталеразливочном ковше; 4 – критическое поступление кислорода извне во время разливки на УНРС, влияющее на оптимальное модифицирование включений; 5 – изменения, происходящие в шлаке промежуточного ковша при серийной разливке на УНРС; 6 – оценка вторичного окисления металла в промежуточном ковше через футеровку. Также в этой главе автором диссертации построены поверхности растворимости компонентов в металле (ПРKM) системы Fe–Mg–Ca–Mn–Al–O–C с целью исследования влияния содержания остаточного кальция на морфологию образующихся неметаллических для трубной стали 20 и стали 09Г2С при температуре 1560 °С.

Далее в главе 3 представлено совершенствование технологии по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей, а также влияние огнеупоров сталеразливочных ковшей на формирование включений, в состав которых входит магний. Также было исследовано применение метода углубленного анализа технологических данных как со сталеплавильного, так и с прокатного производств с увязкой с качеством конечной продукции, то есть трубой. В итоге это позволило выявить важные направления работы по дальнейшему совершенствованию технологии.

В главе 4 приведено исследование механизма влияния содержания в металле неметаллических включений и водорода на свойства шлакообразующей смеси (ШОС) в кристаллизаторе УНРС. Установлены дополнительные значимые технологические параметры производства чистых сталей, которые могут значительно менять содержание неметаллических включений в металле и его качество – вязкость и основность ШОС для кристаллизатора УНРС. Для чистых сталей характерны продольные трещины на поверхности литого металла, а для стали с повышенным содержанием включений – поперечные трещины.

Были выполнены термодинамические расчёты с использованием программного пакета Thermo-Calc для сравнения ассимиляции включений различных ШОС для кристаллизатора. Полученные расчёты и проведенные исследования применения различных ШОС для кристаллизатора позволили выбрать оптимальные смеси, которые подходили для разливки стали с различным содержанием неметаллических включений и газов.

Опытным путем было выявлено, что влияние ШОС на теплопередачу от слитка к кристаллизатору может составлять 6-14 %, а конструкция кристаллизатора до 4 %.

Разработанный алгоритм подбора ШОС для разливки чистых сталей 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. Далее следует осуществлять подбор оптимального ШОС для кристаллизатора по плавлению смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор с целью исключения поверхностных дефектов и аварий на УНРС.

Глава 5 посвящена разработке классификации чистоты стали по содержанию в ней следующих примесей и газов: кислород, водород, азот, сера и фосфор. Отдельно было рассмотрено влияние каждого вредного химического элемента на свойство и качество стали. Автором диссертации разработан и представлен дифференцированный подход к требованиям технологии производства чистых сталей и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства.

Также разработана оценка чистоты металла прямыми методами исследований в сталеразливочном и промежуточном ковшах. Данная методика устанавливает порядок отбора исследовательских проб металла и описывает процедуру металлографических исследований с определением объёмного содержания и размеров включений.

Разработана классификация чистоты стали по содержанию в ней общего кислорода, серы, фосфора, азота, водорода с разделением на «чистую сталь» и «суперчистую сталь». Введенное новое понятие «суперчистая сталь» 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 применяемых материалов в производстве стали (металлошихта, ферросплавы и раскислители, шлакообразующие, флюсы, углеродосодержащие материалы, огнеупоры и др.).

В главе 6 представлен разработанный автором диссертации алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей. Для создания нового метода мониторинга и контроля производства чистых сталей в сталеплавильном производстве были сформулированы пять задач: введение в эксплуатацию системы автоматизированного контроля технологии; стандартизация технологии выпуска плавки, внепечной обработки и разливки стали; внедрение в работу автоматического анализа причин отклонений технологи по всем агрегатам; объединение всей технологической цепочки от выплавки до разливки стали и интеграция разрозненных данных в единую систему; осуществление доступности отчетов по анализу причин отклонений для персонала цеха по итогам работы смены в сравнении с другими сменами и отклонениями от целевых показателей. Автором диссертации был разработан и предложен перечень 26 контролируемых параметров технологии для производства чистых сталей, которые охватывают всю технологическую цепочку, а также учитывают косвенно качество применяемых материалов и огнеупоров. Было показано, что необходимо также активно применять методы автоматизированного управления производством, включая элементы математических, термодинамических моделей, прогнозные и статические модели, построенные с применением физико-химических основ, технологии машинного обучения, больших данных, нейронных сетей и пр.

Представлен алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей, который охватывает все переделы производства высококачественной стали и позволяет внедрить единую систему автоматизированного управления производством, позволяющую решать задачи оптимального управления по таким показателям как себестоимость, темп производства и качество получаемой стали.

В заключении по диссертации содержится перечень основных научных положений и изложение достигнутых практических результатов.

Содержание диссертации соответствует содержанию работ, опубликованных по тематике диссертации. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. На заимствованные материалы, использованные в диссертации, имеются ссылки. Краткое содержание глав диссертационной работы, основные выводы и результаты представлены в автореферате диссертации, содержание которого достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные положения и результаты проведенных исследований обсуждались на международных конференциях и конгрессах.

По теме диссертации опубликована монография «Технология и оборудование УНРС. Производство сортовых и блюмовых непрерывнолитых заготовок» – Саарбрюккен, 2015. – 300 с.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций в 51 печатное работе, из них 16 статей – в изданиях, рекомендованных ВАК, а также отражены в одном патенте и в одном свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ. Опубликовано 10 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Материал диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2 – металлургия черных, цветных и редких металлов: 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.

Таким образом, диссертация Ботникова С.А. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Работа логически структурирована, изложена понятно, четко и грамотно. Последовательность изложения материалов создает целостное представление о содержании диссертации. По главам и по работе приведены соответствующие выводы, отражающие полученные научные и практические результаты. Корректность изложения научного материала, наглядная иллюстрация полученных результатов в виде таблиц, графиков и схем позволяют объективно оценивать содержание, выводы и значимость проведенных научных исследований.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

К достоинствам диссертационной работы следует отнести разработанный комплексный подход получения стали с повышенными требованиями по содержанию неметаллических включений, примесей и газов, глубину проработки рассматриваемой предметной области.

Однако в работе имеется ряд недостатков.

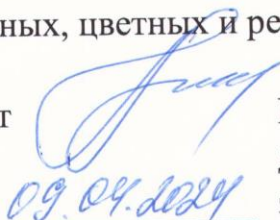
1. Из диссертации не ясно, каким образом установлены границы характеристик «суперчистой» стали.
2. По тексту диссертации говорится о стали вообще, что не совсем корректно, так как к разным типам стали предъявляются разные требования. Хотя исследования касаются исключительно трубных сталей.
3. STM расчет №1: в Таблице 3.1 приведены расчеты поступления кислорода в металл на разных этапах технологической цепочки. Известно, что процесс в конверторе и процесс в современной ДСП – окислительные, перед выпуском металл насыщен и смещается в сторону снижения содержания углерода и кислорода, металл на выпуске может «кипеть», трудно предположить в этом случае поступление в металл кислорода как из воздуха, так и из огнеупоров. А расчет по программе STM показывает, что в момент выпуска в металл поступает самое большое количество кислорода ИЗВНЕ. Значения величины поступления кислорода в металл при других технологических операциях значительно превышают даже общее содержание кислорода по фактическим значениям (в той же таблице). Эти два факта требуют пояснения.
4. В таблице 3.10 сверхвысокое содержание серы и кальция. Непонятно с чем связано.
5. Автор не в полной мере определил фактическую долю влияния свойств огнеупоров на вторичное окисление.
6. Требуется пояснение, как при разливке количество и размер неметаллических включений растет (стр. 316), а по программе «поступление кислорода извне» на этом этапе – самое низкое.
7. Вызывает вопросы предложенная автором модель прогноза температуры в промковше с использованием искусственного машинного интеллекта, так как наиболее целесообразно решать обратную задачу – расчет температуры металла перед отдачей его на разливку.
8. Нет мероприятий по снижению попадания включений с «внутренней поверхности» стакана.
9. Автор говорит о существенном снижении трудоемкости и повышении технико-экономических показателей на металлургических предприятиях за счет новых технологических решений, однако из диссертации не понятно какие конкретные новые **технологические** приемы и мероприятия предлагаются.
10. В диссертации также не определен вклад автора в разработку проблемы в работах, опубликованных коллективно с соавторами.

Указанные недостатки не влияют на представленные выводы и результаты работы.

Общее заключение

На основании рассмотренных материалов диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, позволившее разработать комплексную технологию получения стали с повышенными требованиями к её чистоте по содержанию неметаллических включений, примесей и газов в условиях современных сталеплавильных цехов с учётом всей технологической цепочки, а также способ поиска критических точек поступления кислорода в металл извне в разрабатываемых и действующих технологиях, имеющие достаточно высокий уровень научной новизны и практической значимости. Считаю, что диссертационная работа **Ботникова Сергея Анатольевича** соответствует требованиям п. 9, Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 – металлургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент



дата

Кожухов Алексей Александрович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой металлургии
и металловедения имени С.П. Угаровой,
заместитель директора по науке
и инновациям СТИ НИТУ
«МИСИС»

309516, г. Белгородская обл., г. Старый Оскол,
микрорайон им. Макаренко, д. 42, СТИ НИТУ «МИСИС»
Телефон: +7(910)328-70-62
E-mail: kozhukhov.aa@misis.ru



Я, Кожухов Алексей Александрович, согласен на автоматизированную
обработку персональных данных, приведенных в этом документе


подпись

Подпись Кожухова А.А. заверяю:

Начальник ОК



Копчинская С.В.