

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора кафедры металлургии и химических технологий
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова» Бигеева Вахита Абдрашитовича
на диссертационную работу Ботникова Сергея Анатольевича
**«Разработка комплексной технологии получения стали высокой
чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов»**,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по
специальности 2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Актуальность темы диссертационной работы

Высокие требования к качеству стали привели к разработке большого числа новых технологий, что существенно изменило в последние годы положение дел в сталеплавильной промышленности. Резко возросли и продолжают возрастать требования новых отраслей техники к качеству многих марок стали, что привело к увеличению масштабов производства стали и сплавов, содержащих ничтожно малое количество неметаллических включений, газов и других вредных примесей.

Новые технологии с использованием внепечной обработки стали позволяют производить совершенно новые марки чистой стали с пониженным содержанием в ней примесей и ранее недостижимыми характеристиками механических свойств. Актуально получать сталь с низким содержанием оксидных включений, когда её раскисляют сильными раскислителями, например, алюминий и кальций. Качество металлопродукции прежде всего определяется содержанием вредных примесей (S, P и газы), поэтому для дальнейшего повышения качества стали в первую очередь необходимо повысить эффективность процессов рафинирования стали. В сталеплавильном производстве проводится такая глубокая очистка сталей от примесных элементов, что содержание примесей уже измеряется в ppm, такой уровень еще 30 лет назад считалось невозможным. Кроме того, полученная сталь всегда содержит то или иное количество неметаллических включений, поэтому для уменьшения отрицательного влияния их на свойства металлопродукции недостаточно только снижение содержания включений в сталеразливочном ковше, важно сохранить их низкое содержание до самого процесса кристаллизации металла, то есть во время разливки. В таком случае следует объединение вопросов выплавки и разливки, то есть учитывать всю технологическую цепочку в сталеплавильном производстве.

Получение стали с низким содержанием газов, включений и примесей до сих пор является одной из проблем, затрудняющих развитие

металлургической отрасли РФ. Следует отметить, что задача снижения содержания оксидных включений намного сложнее, чем сульфидных включений. Общепринятых мероприятий и традиционных способов получения стали высокой чистоты недостаточно.

В связи с этим, разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов, основанной на теоретических представлениях и экспериментальных исследованиях рафинирования и сохранения чистоты стали по оксидам, обосновании и практическом применении специальных методов блокирования поступления кислорода извне, в том числе с учётом снижения в стали серы, фосфора, азота и водорода, которому посвящена рецензируемая работа, является важной и, безусловно, *актуальной*.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

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

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

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

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается:

- согласием теоретических оценок с результатами экспериментальных исследований и промышленной практики;

- соответствием данных, полученных в работе, наиболее представительным и достоверным результатам отечественных и зарубежных исследователей;

- успешным решением на основе полученных результатов практических задач, связанных с управлением качеством металлопродукции.

Выбранные автором методы теоретических и экспериментальных исследований, использованные методы физико-химического анализа, включающие как современные и высоконадежные методики, так и классические, отвечают поставленным задачам и позволяют сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Практическая значимость заключается в том, что:

1. Полученные в работе научные результаты являются основой создания современного подхода в разработке и внедрении технологии производства чистых сталей в сталеплавильном производстве, в основу которого заложены новые технологические решения при производстве стали, позволяющие существенно снизить трудоёмкость и повысить технико-экономические показатели на металлургических предприятиях, производящих высококачественную сталь.

2. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проектировании новых и модернизируемых сталеплавильных цехов, а также учтены при разработке автоматизации технологического процесса.

3. Теоретические результаты работы могут быть использованы для разработки новых марок стали в приоритетных направлениях развития промышленности: машиностроении, энергетике и транспорте.

4. Показан новый путь применения комбинации углубленного анализа данных и традиционных методов исследований в металлургическом производстве для выявления первопричин проблем и выбора значимых технологических параметров.

5. На основе теоретических и экспериментальных результатов исследований была разработана техническая документация сквозной технологии производства высококачественной стали, в соответствии с которой осуществляется производство трубной стали на металлургических заводах: АО «ВМЗ» и АО «ПНТЗ».

6. 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».

7. По результатам 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; уменьшена объёмная доля неметаллических включений в 1,5 раза.

Соответствующие письма предприятий приведены в диссертации. Новизна способа производства «чистой» и «суперчистой стали» подтверждена патентом на изобретение №2740949.

По программе SyTherMa-равновесие (STM) получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669194.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и восьми приложений. Диссертационная работа изложена на 438 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 45 таблиц. Список литературы включает 442 источника.

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

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, методы исследования, разработанность темы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, реализация результатов, достоверность и обоснованность результатов и научных выводов, положения, выносимые на защиту и сведения об апробации работы.

В первой главе приведен обзор литературы о влиянии оксидов и сульфидов или их комбинаций на свойства высококачественных марок сталей, методы снижения содержания этих включений в стали, применяемые технологии на отечественных и зарубежных предприятиях для минимизации отрицательных их свойств металла. Показано, что на практике успешно решены задачи по получению ультранизкой концентрации оксидов и сульфидов, но имеется потребность решения задачи по разработке комплексной технологии производства чистых сталей на всей технологической цепочке с учётом вторичного окисления и ухудшения технологических свойств шлака в кристаллизаторе УНРС.

Во второй главе рассмотрено применение вычислительной термодинамики и цифровизации для разработки новой комплексной технологии получения чистых сталей. В этой главе приведены основные математические модели для описания термодинамических свойств металлургических расплавов и современные программные комплексы для расчётов на персональном компьютере. В отдельном параграфе автор

диссертации привел собственную разработку – развитие термодинамического модуля программного комплекса SyTherMa-равновесие (STM). Далее в диссертации данная программа использовалась для выполнения шести 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.

Методом углубленной аналитики и машинного обучения с применением «больших данных» разработана модель прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

В третьей главе описан анализ комплекса мероприятий производства высококачественной стали на всей технологической цепочки: от выпуска плавки до разливки на УНРС. Это самая большая и основная глава по опытному опробованию новых разработок в промышленных условиях, а также объединение раздела выплавки и разливки стали. Осуществлена доработка и развитие 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.

В результате выполненных STM расчётов автором диссертации были разработаны параметры оперативной оценки вторичного окисления при разливке чистых сталей на УНРС. Предложено в режиме реального времени контролировать: прирост содержания в стали азота (цель: не более 5 ppm); изменения содержания химических элементов в стали (цели: снижение Al не более 60 ppm; увеличение Si не более 50 ppm; снижение Mn не более 100 ppm); содержание оксида алюминия в металле (цель: не более 20 ppm); стабильность разливки металла на УНРС (слежение за позицией стопора); за изменения физико-химических свойств ШОС в кристаллизаторе и факты образования поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле.

В этой же главе 3 были построены поверхности растворимости компонентов в металле (ПРKM) системы Fe–Mg–Ca–Mn–Al–O–C. Для исследования влияния содержания остаточного кальция на морфологию образующихся неметаллических включений проведён расчёт при концентрациях, характерных для технологий модифицирования трубной стали 20 и стали 09Г2С при температуре 1560 °С.

В результате проделанной работы и изучения прорывов в условиях действующего электросталеплавильного цеха в г. Выкса 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 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. В результате этого было уменьшено удельное число прорывов с 1,61 до 0,46 шт. на 100 тыс. тонн горячекатаных рулонов (или в 3,5 раза).

Отдельного внимания заслуживает параграф 3.9 «Пути повышения уровня технологии по обслуживанию и обороту сталеразливочных ковшей», где предложены дополнительные мероприятия по снижению в металле магнезиальной шпинели ($MgO \cdot Al_2O_3$). К таким мероприятиям относятся: стабилизация химического состава шлака, контроль химического состава шлака на каждой плавке и используемых материалов, дополнительное оцифровывание технологических параметров ковша, ужесточение требований к технологии применения огнеупоров сталеразливочного ковша, его подготовка, снижение времени нахождения металла в ковше.

В параграфе 3.11 представлены два примера поиска и подтверждения значимых технологических параметров в формировании сталеплавильных дефектов из-за неметаллических включений с применением методов углубленной аналитики и машинного обучения. Пример 1 – это производство тонкого сляба (90,5 мм) и пример 2 – производство сортовых и блюмовых заготовок.

В четвертой главе приведено исследование механизма влияния содержания в металле газов и оксидов на физико-химические 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. В целях исключения влияния водорода 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. С целью оптимального выбора ШОС кристаллизатора для разливки чистых сталей на любых УНРС необходимо стабилизировать процесс на выплавке и внепечной обработке по получению металла с низким содержанием оксидов и газов в сталеразливочном ковше, а

также решить задачи, связанные со вторичным окислением стали между сталеразливочным и промежуточным ковшами и в самом промежуточном ковше. Далее следует осуществлять подбор оптимального ШОС по плавлению смеси и проникновению шлака в зазор слиток-кристаллизатор с целью достижения минимизации поверхностных дефектов на непрерывнолитом металле. Представленный в этой главе разработанный комплекс технологических мероприятий производства чистых сталей для всей технологической цепочки (от выплавки до кристаллизации металла) 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.

Пятая глава посвящена разработке классификации чистоты стали по кислороду, азоту, водороду, фосфору и сере, а также представлен дифференцированный подход к требованиям технологии производства чистых сталей и необходимому набору оборудования сталеплавильного производства. Дополнительно была выполнена оценка чистоты стали прямыми методами исследований с целью определения объемной доли включений. Введено новое понятие «суперчистая сталь», которая в три раза чище по понятию А.П. Гуляева, то есть по сумме всех загрязнений атомов на 1 млн. атомов железа. Как отметил автор диссертации, данная классификация позволяет дифференцировано подходить одновременно как к требованиям технологии, так и к требованиям необходимого набора оборудования сталеплавильного производства, и в том числе впервые к техническим требованиям материалов, применяемых в производстве стали.

В шестой главе представлен разработанный алгоритм корректировки технологии производства чистых сталей и новый метод мониторинга и контроля производства этой стали. Представленный алгоритм корректировки технологии учитывает нежелательные (отрицательные) элементы производства чистых сталей: вторичное окисление металла во время разливки, попадание ковшевого шлака в промежуточный ковш, существенное изменение физико-химических свойств шлака в кристаллизаторе УНРС.

Предлагаемый алгоритм охватывает все процессы производства чистых сталей, логистику организации и подходы к созданию новых методов, способов и средств совершенствования сталеплавильного процесса, носит общий характер и может служить инструментом для оперативного поиска высокоэффективных технологических решений практических задач для технологии выплавки, внепечной обработки и разливки стали.

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.

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.

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

Оформление. Диссертация и автореферат написаны четко и ясно; стилистика соответствует современному литературному языку. При оформлении работы использованы графические и табличные материалы, выполненные на высоком иллюстративном уровне. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации.

По диссертации имеются **замечания:**

1. В работе основным методом исследования являлось опытное опробование новых разработок только в электросталеплавильных цехах и при этом не было проведено исследований для самого массового способа производства стали в мире – это кислородно-конвертерное. Логичным было бы уточнение в названии диссертации «... в условиях современных электросталеплавильных цехов».

2. В диссертации очень большой литературный обзор: 85 страниц в главе 1 и около 17 страниц в главе 2. Это составляет более четверти объема содержательной части (без приложений) диссертации.

3. В работе не учитывается содержание примесей цветных металлов, следует также учесть, что данные примеси существенно снижают эксплуатационные свойства металлопродукции, то есть в термине «суперчистая сталь» это необходимо учесть. В связи с этим следовало бы скорректировать заявленный в диссертации критерий «..содержащей в сумме менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа».

4. К сожалению в работе практически не нашлось места изучению влияния первородных шихтовых металлических материалов на качество стали.

5. В диссертации нет описания алгоритма программного модуля SyTherMa, видимо автор относит его к общеизвестным в сталеплавильном производстве. Автор приводит только исходные данные и результаты расчетов. Поэтому вызывает сомнение универсальность этого модуля.

6. На мой взгляд, следовало бы больше внимания уделить образованию (в том числе за счет вторичного окисления) и выделению неметаллических включений. В современной практике негативное влияние НВ часто превосходит влияние вредных элементов. В итоге хотелось бы иметь системные рекомендации по ограничению образования НВ и их выделению из

жидкой стали.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают ценности и важности диссертационной работы.

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 *В. Бигеев* Бигеев Вахит Абдрашитович,
доктор технических наук,
профессор кафедры металлургии *18.04.2024*
и химических технологий ФГБОУ
«Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

455000, г. Магнитогорск, Челябинская обл., пр. Ленина, д. 38.
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет
им. ГИ Носова»,
Телефон: +7(351)901-82-00
E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Я, Бигеев Вахит Абдрашитович, согласен на автоматизированную
обработку персональных данных, приведенных в этом документ

В. Бигеев

Подпись Бигеев В.А. заверяю:

Подпись и должность, печать, дата

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ
Заведующий отделом делопроизводства
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Д.Г. Семенова
Д.Г. Семенова