



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов  
и технологий**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ).  
Институт новых материалов и технологий.

ул. Мира, 28, Екатеринбург, Россия, 620002,  
тел./факс: +7 (343) 374-53-35, 375-44-39  
e-mail: inmt@urfu.ru, [www.urfu.ru](http://www.urfu.ru)

11.04.2024 № 33.20-32/98  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы **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»

Чистота стали является важным фактором её качества и потребность в более чистых сталях растёт с каждым годом. Отсутствие общего подхода получения «чистой стали» и учёта всех происходящих процессов в единой технологической цепочке «выплавка - выпуск плавки - внепечная обработка - разливка стали», приводят к ошибочным решениям по себестоимости стали или производительности цеха. В этих условиях существенно повышается необходимость поиска новых подходов к решению указанных проблем и проведения дальнейших исследований 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 30 лет, требуется комплексный подход с учётом теории и практики процессов производства стали для дальнейшего решения рассматриваемых проблем.

Таким образом, представленная диссертационная работа, посвященная разработке комплексной технологии 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, несомненно является актуальной.

Представленная работа обладает научной новизной:

1. Дальнейшее развитие получило использование 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, основное достоинство которого, в возможности быстрого определения 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.

Таким образом, теоретическая значимость работы состоит в развитии научных основ сквозной технологии получения высококачественной раскисленной алюминием стали с низким содержанием неметаллических включений, примесей и газов, в рамках развитого автором уникального комплекса аппаратных средств, модели расчёта взаимодействия компонентов металла, шлака и газовой фазы с целью контроля и управления окислением стали с учётом внешних потоков кислорода в металл. Предложена методика поиска и оценки критических зон в технологии поступления излишков кислорода, которая может видоизменяться и модернизироваться в будущем, что позволит расширить и развить как известные, так и дополненные данной работой подходы производства чистых сталей. Теоретические результаты работы могут быть использованы для разработки новых марок стали в приоритетных направлениях развития промышленности: машиностроении, энергетике, транспорте и др.

Практическая значимость представленной диссертационной работы заключается в том, что полученные в работе научные результаты являются основой создания современного подхода в разработке и внедрении технологии производства чистых сталей в промышленности. Предложены новые технологические решения при производстве сверхчистых сталей, позволяющие существенно снизить трудоёмкость и повысить технико-экономические показатели на металлургических предприятиях, производящих высококачественную сталь. Результаты диссертационной работы 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.

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

Достоверность и обоснованность результатов и научных выводов представленной работы обеспечены большим объемом выполненных экспериментов, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов; большим количеством экспериментальных и промышленных плавов; достаточным объемом 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.

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, один патент на изобретение и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

К представленной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. На стр. 15 автореферата указано «Выбраны целевые значения по содержанию в ковшевом шлаке оксидов с целью получения температуры плавления его от 1455 до 1470 °С:  $\text{CaO/SiO}_2 \geq 5,0$ ;  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3 \leq 1,9$ ;  $\text{SiO}_2 \leq 10$  масс. %;  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 24$  масс. %». Конечно в этом случае шлак будет жидкоподвижным, но оксид  $\text{Al}_2\text{O}_3$  является амфотерным и начиная с 16-18 масс. % начинает проявлять кислотные свойства, что скажется на эффективности рафинирования металла. Необходимо дать пояснения.

2. Далее на стр. 17 указано: «Выполненные расчёты и работы по оптимальному выпуску плавки для стали, раскисленной алюминием, из сталеплавильного агрегата позволили разработать следующие мероприятия и рекомендации, одна из которых следующая: 2 – в качестве раскислителя алюминия применять литой алюминий по ГОСТ 295 вместо ферроалюминия брикетированного». При получении «чистой стали» использование «грязного» брикетированного раскислителя притивопоказано, и данный вывод сделан не менее 10 лет назад, автором данного отзыва. Но желательно все таки пояснить с точки зрения автора работы данную рекомендацию.

3. На стр. 18 автореферата указано, что «совершенствование технологии по минимизации образования магнезиальной шпинели выглядит следующим образом: в шлаке повышать концентрацию  $Al_2O_3$  и не использовать материалы с повышенным содержанием  $MgO$ ; в металле минимизировать концентрацию растворенного алюминия [Al] и не применять материалы с повышенным содержанием магния». Однако далее автор указывает, что «Выполненный ряд мероприятий с учётом всех технологических аспектов производства чистых сталей в сталеразливочном ковше позволил стабилизировать границы концентрации в шлаке  $MgO$  с 4,0-12,0 масс. % до 4,5-8,5 масс. %. Желательно показать это момент более подробно, т.к. в настоящее время доказано, что магнезиальная шпинель ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) способствует образованию гарнисажа на поверхности сталеразливочного ковша, увеличивая срок его службы и препятствуя образованию неметаллических включений. Только в этом случае необходимо соблюдать следующие рекомендации: повышать содержание в шлаке  $MgO$  до значений 7,5–8,0 % и  $Al_2O_3$  более 15 %.

Указанные замечания не снижают в целом положительной оценки диссертационной работы, которая полностью соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2023 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, **Ботников Сергей Анатольевич**, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Директор Института новых материалов и Технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный Университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», д.т.н. (05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов), проф.



Шешуков Олег Юрьевич  
подпись (Фамилия И.О.)

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28.  
Тел.: (343)3754439  
E-mail: [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru)

Я, Шешуков Олег Юрьевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе