

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.437.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ)» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 22.05.2024 г. №52

О присуждении Ботникову Сергею Анатольевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка комплексной технологии получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов» по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов принята к защите 17.01.2024 г. (протокол заседания №52П) диссертационным советом 24.2.437.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, утвержденным приказом №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Ботников Сергей Анатольевич, 14.01.1981 года рождения, в 2003 году окончил Южно-Уральский государственный университет по специальности «Физико-химические методы исследования процессов и материалов». Диссертацию на соискание ученой степени кандидат технических наук на тему «Влияние химического состава и технологии рафинирования низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали на параметры разливки сортовой МНЛЗ» Ботников Сергей Анатольевич защитил в 2009 году в диссертационном совете Д 212.298.01, созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего

профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет».

Соискатель Ботников Сергей Анатольевич прошёл подготовку в докторантуре по специальности (направленности) 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» на кафедре материаловедения и физико-химии материалов факультета материаловедения и металлургических технологий Южно-Уральского государственного университета с 01.12.2012 г. по 30.11.2016 г. и далее продолжил работу по тематике своего исследования в профильном институте АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»). С 2003 года АО «РусНИТИ» (РосНИТИ) заключило долговременное стратегическое соглашение партнерства с крупнейшими отечественным трубным холдингом – «Трубная Металлургическая компания» («ТМК»), а также с 2007 г АО «РусНИТИ» включен в контур консолидации предприятий «ТМК» и на его базе Управляющая компания создаёт единую систему управления инновациями форме Научно-технического центра «НТЦ ТМК».

В настоящее время Ботников Сергей Анатольевич работает в должности заместителя директора по эффективности сталеплавильного производства в направлении технологии и качества в Публичном акционерном обществе «Трубная Металлургическая Компания».

Диссертация выполнена в лаборатории металлургических технологий АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности».

Научный консультант – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Михайлов Геннадий Георгиевич.

Тема диссертации утверждена Советом физико-металлургического факультета ЮУрГУ 22.01.2013 г., протокол № 2.

Официальные оппоненты:

– Бигеев Вахит Абдрашитович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры металлургии и химических технологий (г. Магнитогорск);

– Косырев Константин Львович, доктор технических наук, Открытое акционерное общество «Электростальский завод тяжелого машиностроения», советник технического директора (г. Электросталь);

– Кожухов Алексей Александрович, доктор технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»), заведующий кафедрой металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой, заместитель директора по науке и инновациям (г. Старый Оскол)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном председателем НТС Института металлургии и машиностроения (ИМиМ), доктором технических наук, профессором, лауреатом ГП СССР и премии Правительства РФ Дубом Владимиром Семёновичем, учёным секретарем НТС ИМиМ Соловьевой Маргаритой Сергеевной, и утвержденном генеральным директором ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», доктором технических наук Орловым Виктором Валерьевичем, указала, что:

- 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;

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

- 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;

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

- диссертационная работа 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 от 01.10.2018 г. «О порядке присуждения учёных степеней»). Работа Ботникова С.А. решает важные научные задачи, оптимизацию технологии

раскисления широкого распространённых сталей, а также экономическую задачу получения конкурентной высококачественной продукции, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Соискатель имеет 51 опубликованную работу и из них в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК опубликовано 16 работ, 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.

В диссертацию включены результаты, полученные автором лично, авторский вклад составляет 65 стр. Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают ее основные положения. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. 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. (ВАК, Scopus). (авторская доля 4 стр. из 6 стр.)
2. Моров Д.В. 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 // Черные металлы. – 2018. – № 9. – С. 34-39. (ВАК, Scopus). (авторская доля 4 стр. из 6 стр.)
3. Моров Д.В. Методы оценки процессов вторичного окисления металла в промежуточном ковше УНРС. Часть 2. Термодинамические расчеты / Д.В. Моров С.А. Ботников, В.Н. Лавров // Черные металлы. – 2018. – № 11. – С. 53-57. (ВАК, Scopus). (авторская доля 4 стр. из 5 стр.)

4. 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. (ВАК)
5. 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. (ВАК, Scopus). (авторская доля 4 стр. из 6 стр.)
6. Ботников С.А. Фазовые равновесия при обработке алюминием и кальцием экономнолегированной марганецсодержащей стали в агрегатах, футерованных огнеупорами на основе магнезита / С.А. Ботников, Л.А. Макровец, И.В. Бакин, Г.Г. Михайлов // Черная металлургия. Бюллетень научной, технической и экономической информации – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 220-230. (ВАК, категория К2). (авторская доля 7 стр. из 11 стр.)
7. Ботников С.А. Новый подход к разработке эффективной технологии производства стали с низким содержанием неметаллических включений / С.А. Ботников // Черные металлы. – 2023. – № 7. – С. 22-29. (ВАК, Scopus, категория К2)
8. Ботников С.А. Физико-химические расчёты сталеплавильных процессов и прогнозные модели для производства чистых сталей / С.А. Ботников // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79, № 10. – С. 818-826 (категория К2).

Достоверность и обоснованность результатов и научных выводов работы обеспечены большим объёмом выполненных экспериментов, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов; большим количеством экспериментальных 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 диссертацию и автореферат поступило 16 отзывов (все – положительные), содержащие следующие замечания и вопросы:

1. От начальника электросталеплавильного отдела Акционерного общества «Оскольский электрометаллургический комбинат имени Алексея Алексеевича Угарова» **Коршикова Сергея Петровича**. Вопросы и замечания: 1) В работе исследованы только трубные марки стали, производимые на двух трубных заводах (ПНТЗ и ВМЗ). Как можно результаты работы использовать для других групп марок сталей? 2) В термине «суперчистая сталь» следует также рассматривать содержания в ней цветных примесей. 3) На стр. 33-34 указано, что объёмная доля включений в промежуточном ковше по сравнению со стальковшом в среднем повышается на 40 % или с 0,0092 до 0,0129 об. %, а разброс данных 0,0043-0,0230 об. % и 0,0063-0,0210 об. % соответственно. Учтена ли тут ошибка (погрешность) при отборе проб для исследования содержания в них неметаллических включений, так как в процессе отбора пробы металла имеет место попадание шлака и окисления металла?

2. От научного руководителя дирекции по развитию технологий и продуктов АО «Выксунский металлургический завод», доктора технических наук **Эфрона Леонида Иосифовича** и начальника управления по технологии металлургического производства Инженерно-технологического центра АО «Выксунский металлургический завод», кандидата технических наук **Кислицы Вячеслава Владимировича**. Замечания: 1) По нашему мнению, требует уточнения предложенный автором термин «суперчистая сталь», поскольку требования к чистоте, по нашему мнению, зависят от назначения стали. 2) Автором справедливо обозначена необходимость снижения количества окисленного печного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш в процессе выпуска плавки из сталеплавильного агрегата (не более 6,0

кг/т стали, цель – 2,0-3,0 кг/т стали). Вместе с тем предложения по практической реализации данного мероприятия отсутствуют. 3) Достаточно подробно проанализированы источники внешнего поступления в металл кислорода в ходе внепечной обработки и разливки на МНЛЗ. Однако вывод о целесообразности блокирования поступления кислорода извне не подкреплён конкретными рекомендациями, каким образом можно дополнительно ограничить возможность контакта металла с воздухом, кроме уже известных и широко применяемых в современных сталеплавильных цехах способов защиты струи от вторичного окисления. 4) Вывод о негативном влиянии объёмной доли неметаллических включений на качество металлопродукции, в частности труб, и необходимости перехода к технологии производства «суперчистой стали» с целью снижения дефектов и повышения выхода годного, не базируется на фактических данных АО «ВМЗ» и АО «ПНТЗ» и носит общий характер.

3. От заведующего кафедрой прикладных информационных технологий и программирования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», доктора технических наук, доцента **Рыбенко Инны Анатольевны**. Замечания: 1) В автореферате не представлены результаты сходимости построенной прогнозной модели температуры металла в промежуточном ковше и её точность. 2) В примере STM расчёта №3 «Оптимизация химического состава шлака в сталеразливочном ковше» было бы целесообразно привести пояснения, как выполняется оптимизация и как достигается конкретный комплекс целевых условий, обеспечивающий экстремум. 3) На стр. 30 автореферата не полностью раскрыт раздел «Методы углубленного анализа для разработки технологии производства чистых сталей». Следовало привести примеры с применением методов углубленной аналитики и машинного обучения.

4. От доцента кафедры металлургических технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет»,

кандидата технических наук **Шипельникова Алексея Александровича**. Замечания: 1) 1. На стр. 10 автореферата п. 5 «...содержание кислых оксидов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на вторичное окисление стали...» – в общей физической химии известно, что оксид  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  по своим химическим свойствам является амфотерным. 2) На стр. 37, второй абзац сверху: «... «Чистая сталь» по Гуляеву А.П. содержит вредных примесей и газов не более 1500 атомов на 1 млн. атомов железа...следует ограничивать следующее содержание примесей и газов (масс. %):  $[\text{O}]_{\text{общий}} \leq 0,00500\%; \dots$ » - сейчас в сталеплавильном производстве принято обозначать концентрацию вредных примесей не в «% масс» или «атомных» ppm, а в «массовых» ppm: 1 ppm = 10<sup>-4</sup>% масс.; видится наиболее целесообразности здесь и далее указывать концентрацию  $[\text{O}]_{\text{общий}}$  и др. элементов как: « $[\text{O}]_{\text{общий}} \leq 50 \text{ ppm}$ ».

5. От технического директора Общества с ограниченной ответственностью «ВПО Сталь», кандидата технических наук **Съёмщикова Николая Семёновича**. Замечания: 1) В автореферате не приведены степени корреляции результатов расчётов разработанных моделей фактическим данным. 2) В работе рассмотрено влияние на качество получаемой металлопродукции Ca, Al, O, S, H и N, однако влияние Ba и других редкоземельных материалов не рассмотрено.

6. От профессора кафедры литейных процессов и материаловедения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктора технических наук, доцента **Сычкова Александра Борисовича**. Замечания: 1) Научная новизна (стр. 7-8 автореферата) работы состоит из 7 пунктов, в которых содержатся теоретические основы диссертационных исследований. Однако, было бы более эффективным представить все положения новизны с числовым и характеристиками во всех пунктах (без числовых данных предоставлены 4 пункта научной новизны). 2) В автореферате (стр. 41, рис. 7) представлены фотографии неметаллических включений (НВ) с результатами

микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) и их химического состава в сталеразливочном (СК) и промежуточном (ПК) ковшах в тонком слябе. Было бы более достоверным представлением НВ не в виде распределения состава химических элементов, а их окислов-оксидов. 3) На стр. 47 и 47-50 автореферата представлены два раздела – «Заключение по работе» и «Основные выводы и результаты» соответственно. Видимо эти два раздела можно было бы объединить в один.

7. От директора Института новых материалов и Технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктора технических наук, профессора **Шешукова Олега Юрьевича**. 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 противопоказано, 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 магниальной шпинели выглядит следующим образом: в шлаке повышать концентрацию  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 этот момент более подробно, т.к. настоящее время доказано, что магнезиальная шпинель ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) способствует образованию гарнисажа на поверхности сталеразливочного ковша, увеличивая срок 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%.

8. От старшего менеджера Публичного акционерного общества «Магнитогорский металлургический комбинат», кандидата технических наук **Юречко Дмитрия Валентиновича**. Замечания: 1) Автор не показал влияние на чистоту стали элементов со сродством к кислороду выше, чем у кальция, например, цирконий и РЗМ. 2) Не рассмотрен класс чистых сталей, не содержащих алюминий, таких как кордовая и рельсовая. 3) В автореферате не представлены основные составляющие полученного экономического эффекта в размере 269,1 млн. рублей.

9. От профессора кафедры Металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Институт технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», доктора технических наук, старшего научного сотрудника **Павлова Александра Васильевича**. Замечания: 1) В работе не приводится прогноз по дальнейшему развитию требований к степени чистоты стали, не проведена оценка фундаментальной перспективности этого направления совершенствования качества стали и технологии её производства. 2) Согласно седьмому пункту научной новизны разработана и внедрен новый алгоритм корректировки технологических режимов

производства высококачественной стали, базирующийся на непрерывном мониторинге и контроле параметров ключевых элементов всей технологической цепочки, учитывающей взаимосвязанность работы отдельных агрегатов. Достоверность предложенного нового алгоритма корректировки технологических режимов не вызывает сомнений. Однако сам алгоритм и его новизна раскрыты недостаточно полно. Не раскрыты конкретные технологические приемы.

10. От заместителя директора Научного центра физико-химических основ и технологий металлургии Государственного научного центра федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», доктора технических наук, старшего научного сотрудника **Родионовой Ирины Гавриловны**. Замечание: в работе не рассмотрены результаты улучшения коррозионной стойкости стали, так как снижение в металле неметаллических включений напрямую влияет на эксплуатационные свойства трубной стали.

11. От специалиста по сбыту, инженера Общества с ограниченной ответственностью «РХИ ВОСТОК СЕРВИС», кандидата технических наук **Головня Александра Александровича**. Замечание: в автореферате на странице 29 в таблице 5 не представлены все современные типы огнеупорных масс для рабочего слоя промежуточного ковша УНРС. Например, массы на основе оксида алюминия.

12. От профессора кафедры «Технология материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный Технический университет», доктора технических наук **Зюбана Николая Александровича**. Замечание: в автореферате отсутствуют данные по оценке влияния технологии получения «суперчистой» стали на уровень свойств, полученных из неё изделий – механических эксплуатационных, специальных, что несколько сужает значимость представленных фундаментальных объёмных исследований.

13. От директора Департамента технологического развития Публичного акционерного общества «Мечел» **Зуева Дмитрия Сергеевича**. Замечания: 1) В работе не представлено окисление следующих высокоактивных элементов: титан и бор. 2) В работе не учтено влияние на качество металлопродукции цветных примесей (Cu, As, Sn, Sb и др.), по-нашему мнению, это влияние также следует рассматривать как показатель чистоты стали.

14. От директора Дирекции по разработке новых технологий процесса Публичного акционерного общества «Новолипецкий металлургический комбинат», кандидата технических наук **Ковалева Дениса Анатольевича** и руководителя экспертного направления Дирекции по развитию новых технологий процесса Публичного акционерного общества «Новолипецкий металлургический комбинат», кандидата технических наук **Дагмана Алексея Игорьевича**. Вопросы и замечания: 1) В автореферате не приведены механизмы снижения дефектов из-за неметаллических включений и повышения выхода годного металла. Сколько было и сколько стало дефектов по их видам? 2) Недостаточно полно раскрыто в терминах «чистая сталь» по Гуляеву А.П. и «суперчистая сталь» способы раскисления: алюминием или кремнием. 3) В таблице 1 на странице 14 представлено содержание магния в металле. В автореферате не приведен метод определения содержания магния в металле и какая его погрешность?

15. От профессора кафедры металлургических технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донбасский государственный технический университет», кандидат технических наук **Куберского Сергея Владимировича**. Замечания: 1) В пункте 4 на стр. 7 научной новизны. Не раскрыто преимущество нового термина «суперчистая сталь» для современного производства высококачественной стали. 2) На стр. 31 автореферата в последнем абзаце представлена рекомендация «В целях исключения влияния водорода на производство чистых сталей, а, именно, «суперчистой стали», рекомендуется осуществлять вакуумирование металла». По моему мнению, это является излишним требованием к технологии, которое может привести к

увеличению себестоимости металла в сталеплавильном переделе. Следует к такой рекомендации было бы подойти дифференцировано, то есть выполнить разделение технологических маршрутов для вакуумной и без вакуумной внепечной обработки расплава.

16. От научного руководителя Акционерного общества «Уральский институт металлов», главного научного сотрудника Института металлургии Уральского отделения РАН, Академика РАН, доктора технических наук, профессора **Смирнова Леонида Андреевича**. Вопросы и замечания: 1) Насколько правомочно применение полученных в диссертационной работе результатов и выводов к конвертерному производству стали, отличающемуся, в частности и прежде всего, более высокой окисленностью металла и шлака от электросталеплавильного процесса? 2) Диссертант не рассматривает в работе цветные примеси как элемент чистоты стали, что является не совсем верным, так как именно эти примеси напрямую ухудшают эксплуатационные свойства стали и металлопродукции из неё. 3) В работе не рассмотрены способы и направления технологии удаления фосфора до более низких концентраций, согласно термину, «суперчистая сталь» – не более 80 ppm. При этом, исходя из таблицы 5.1 на странице 302, автор работы предоставил один технологический вариант получения такой стали: прямое восстановление (100 %) – выплавка электростали. Рекомендовать использовать только высокочистую шихту по фосфору считаю недостаточным, необходимы и другие технологические решения по более глубокой дефосфорации металла с достижением содержания фосфора  $\leq 0,003\%$ .

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием темы диссертационной работы соискателя профилю их научной деятельности и области научных компетенций. Оппоненты и ведущая организация широко известны своими достижениями в данной области науки, имеют публикации по исследованиям, близким к проблеме работы соискателя. Благодаря этому они способны определить научную и практическую ценность диссертации соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработан** новый комплексный подход об учёте окислительного потенциала в системе «металл-шлак-газ», при контроле внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки. Данный подход позволяет определить проблемные элементы на всей технологической цепочке в разрабатываемых и действующих технологиях получения стали высокой чистоты в условиях современных сталеплавильных цехов, что позволяет разработать эффективные способы решения возникающих проблем качества чистых и сверхчистых сталей.

**Предложен** подход к организации промышленного производства высококачественной стали на всех этапах технологии от выплавки до разливки и использование информации внешнего поступления кислорода из атмосферы, материалов, шлака и футеровки для разработки, управления и совершенствования плавки стали.

Экспериментально **доказано**, что для выбора шлакообразующей смеси (ШОС) кристаллизатора для разливки чистых сталей на любых УНРС необходимо получить металл с низким содержанием оксидов и газов в сталеразливочном ковше, а далее следует подобрать оптимальную ШОС по её плавлению и проникновению шлака в зазор между слитком и кристаллизатором с целью исключения формирования поверхностных дефектов стали и аварийных ситуаций на УНРС.

**Введен** новый термин «суперчистая сталь» для промышленного применения, обозначает сталь, содержащая сумму менее 500 атомов кислорода, серы, водорода, азота и фосфора на 1 млн. атомов железа.

**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.

*Применительно к проблематике исследования результативно использован комплекс существующих прямых (оптическая и электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ) и косвенных (плавления в потоке инертного газа, термоЭДС) методов исследования неметаллических включений, в том числе термодинамическое моделирование в вычислительных программах для сталеплавильных процессов, а также исследовано влияние химического состава стали на морфологию неметаллических включений путём построения ПРКМ (поверхность растворимость компонентов в металле); использованы методы углубленного анализа данных (дерево принятия решений, ансамбли деревьев принятия решений, ядерный метод опорных векторов, градиентный бустинг); использовано опытное опробование новых разработок в промышленных условиях.*

**Изложены** основы комплексной технологии получения стали высокой чистоты для современных сталеплавильных цехов, включающие ключевые технологические параметры производства чистых сталей, от выплавки до разливки металла.

**Раскрыто** влияние чистоты стали и физико-химических свойств и структуры шлака в кристаллизаторе на формирование продольных и поперечных дефектов на непрерывнолитом металле, **изучены** связи данного явления с изменением теплопереноса от корочки слитка к кристаллизатору.

**Проведена модернизация** алгоритма корректировки технологии производства чистых сталей на всей технологической цепочке «выплавка–выпуск–внепечная обработка–разливка».

**Значение** полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**Разработана и внедрена** комплексная технология получения стали высокой чистоты для современных сталеплавильных цехов (АО «Выксунский металлургический завод» и АО «Первоуральский новотрубный завод»).

**Определена** перспектива практического использования поиска проблемных точек по всей технологической цепочке для сталеплавильного производства.

**Созданы** практические рекомендации корректировки технологии производства «суперчистой стали» на базе комплексного учёта повышенных требований к производству.

**Представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию технологии получения чистых сталей с охватом производственных процессов и подходов для создания новых методов, способов и средств для оперативного поиска высокоэффективных технологических решений практических задач для технологии выплавки, внепечной обработки и разливки стали.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила, что **экспериментальные** исследования, а также промышленные плавки выполнены на современном оборудовании с действующей поверкой и на высокотехнологичных приборах с современным программным обеспечением, показавших воспроизводимость результатов. Идея о ведущей роли окислительного потенциала в системе «металл–шлак–газ» базируется с ранее опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами и не противоречит современным теоретическим представлениям. Применение стандартных, хорошо зарекомендовавших себя методик исследования, применявшихся в других исследованиях на протяжении многих лет, а также методик, в том числе авторских, на основе стандартных, обеспечивает получение достоверных первичных данных, служащих основой для дальнейшего анализа и построения соответствующих выводов. **Установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации.

**Личный вклад** соискателя состоит в определении актуальности, цели и постановке задач исследования; выдвижении основных идей, их научном обоснованием; личном участии в проведении экспериментов и термодинамических и материальных расчётов по раскислению, легированию и шлакообразованию в сталеразливочном ковше, а также расчётов оценки вторичного окисления металла; анализе и интерпретации результатов, формулировкам научных основ разработки комплексной технологии производства чистых сталей, основных положений и выводов; подготовке основных публикаций и выступлении с докладами на научно-технических конференциях, конгрессах и форумах.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Какая генеральная идея у вашей докторской диссертации? Могли бы вы сформулировать чётко, какие новые научные знания были получены в вашей работе?

2. Содержание в стали водорода и оксидов нарушают стабильную разливку из-за возникновения дефектов и аварийных ситуаций. С другой стороны, низкая концентрация оксидов и водорода, то есть разливка чистых сталей, может привести к формированию продольных трещин на среднеуглеродистых сталях и т.д. То есть низкое содержание водорода и неметаллических включений – это тоже плохо? То есть если водород влияет вот так что и много плохо и мало плохо. Тогда есть оптимум?

3. Хотелось бы разобраться с терминологией. Автор диссертации считает, что включения, образующиеся в процессе вторичного окисления, относятся к экзогенным, т.е. внесенными в металл другими материалами. Данный процесс в принципе мало чем отличается от процесса окисления в период кислородной продувки и последующего раскисления, продуктами которого являются эндогенные неметаллические включения.

4. Почему цветные примеси не стали объектом вашего исследования?

5. Требуется пояснение, как при разливке количество и размер неметаллических включений растёт, а по программе «поступление кислорода извне» на этом этапе – самое низкое.

Соискатель Ботников С.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Генеральная идея – это сквозной контроль окислительного потенциала в системе металл-шлак-газ на всех этапах технологии получения стали и цифровое использование этих данных для разработки, совершенствования управления технологии плавки стали. Для снижения в металле неметаллических включений были определены граничные условия концентраций магния, которые раньше никто не определял в комплексе с отношением  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , содержанием алюминия и серы. Определение вторичного окисления от футеровки, раньше это не брали в учёт. Разработаны и применены научные основы сквозной технологии получения чистой высококачественной раскисленной алюминием стали с низким содержанием неметаллических включений. На основе полученных результатов создан современный подход к комплексной разработке и внедрению технологии производства чистых сталей.

2. Для того чтобы минимизировать данный негативный момент то есть, когда повышается удельный тепловой поток в кристаллизаторе (формирование аморфной структуры шлака) и образуются продольные поверхностные трещины на непрерывнолите металле из перитектических марок сталей необходимо повысить основность шлакообразующей смеси (перейти от аморфной к кристаллической структуре шлака) для того, чтобы стабилизировать и снизить тепловой поток. Для условий не изменения физико-химических свойств ШОС кристаллизатора оптимум по водороду мы установили от 4 до 7 ppm. Выше 7-8 ppm будут формироваться поперечные трещины или прорывы кристаллизующейся корочки металла, а ниже 4-5 ppm – продольные трещины.

3. В чистом виде такой процесс не происходит в промышленной практике. Всегда присутствует комплексное видоизменение включений за

счёт одновременно протекающих процессов формирования включений из-за поступления кислорода в расплав и взаимодействия шлака и огнеупора. Обнаруженные комплексные неметаллические включения в виде алюминатов кальция и магния (в сульфидной оболочке или без) могут также содержать оксиды кремния и марганца, а в некоторых случаях натрия, калия и фтора. Эти неметаллические включения следует относить к классу экзогенных или смешанной природы образования «экзо-эндогенных» или «эндо-экзогенных», образующихся в результате различных физико-химических процессов в жидком и затвердевающем металле.

4. Изначально была правильная постановка задачи исследовать именно влияние неметаллических включений, а не цветных примесей. Исследования проводили на тех дефектах, которые связаны с образованием неметаллических включений. Пробы металла с дефектами, связанные с высоким содержанием меди и других цветных примесей не исследовали в данной работе.

5. Это новые данные, которые в диссертацию не вошли. Ошибка связана с отбором проб металла то есть, когда мы отбираем пробу металла, и она загрязняется шлаком и процессом вторичного окисления. Сейчас есть специальные пробоотборники чтобы это исключить. В основном, в металле промежуточного ковша размер включений снижается, но если отмечено их увеличение, то это грубое нарушение технологического процесса.

На заседании 22.05.2024 г. диссертационный совет принял решение: за новые научно-обоснованные основы технологии получения чистой высококачественной раскисленной алюминием стали с низким содержанием неметаллических включений и газов, заключающиеся в разработке рекомендаций с опорой на фундаментальные представления о характере взаимодействий компонентов в системе металл–шлак–газовая фаза в ходе внепечного рафинирования и разливки стали, а также за созданный современный подход к разработке и внедрению технологии производства чистой стали присудить Ботникову С.А. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 5 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 19, против - 0.

Председатель

диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



Илья Валерьевич Чуманов

Ученый секретарь

диссертационного совета,  
кандидат технических наук,  
доцент

Наталья Александровна Шабурова

Дата оформления: 22.05.2024 г.