

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Доктора технических наук, профессора Протопопова Евгения
Валентиновича на диссертационную работу Метелкина Анатолия Алексеевича
«Развитие технологических основ комплексной ковшевой обработки
расплава после выпуска из сталеплавильного агрегата»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Актуальность темы диссертационного исследования

Основное направление диссертационной работы Метелкина А.А. связано с созданием научно обоснованных подходов и развитием комплексной технологии внепечной обработки стали при возможности постадийного осуществления технологических операций в различных агрегатах ковшевой металлургии, что позволяет корректировать полученные на предыдущей стадии результаты без снижения темпа производства. Объективная потребность в таких агрегатах ковшевой металлургии значительно обострилась в связи с развитием конвертерного производства стали. Кислородный конвертер резко увеличил производительность единичного агрегата в сталеплавильном производстве, однако, в отличие от существовавших ранее мартеновских и электросталеплавильных процессов, такой агрегат приспособлен только для проведения операций расплавления лома, обезуглероживания и дефосфорации, причём продуктом конвертерной плавки всегда является не готовая сталь, а только окисленный полупродукт. Такой технологический маршрут предопределяет проведение операций раскисления, легирования и дальнейшего рафинирования полученного полупродукта непосредственно в сталеразливочном ковше процессами внепечной металлургии. Поэтому сталь необходимого химического состава и качества формируется, по существу, в сталеразливочном ковше, в котором расплав подвергается различной обработке в одном или нескольких специализированных агрегатах, например, как в представленной диссертации, в агрегатах АКОС, АКП.

В данном случае термодинамические условия проведения технологических операций в специализированных внепечных агрегатах (вакуум, регулируемый состав атмосферы, шлак оптимального состава) и более благоприятные кинетические условия (интенсивное перемешивание, большая поверхность взаимодействия фаз, возможность введение добавок в объём расплава), обеспечивают достижение более существенных результатов, чем при аналогичном проведении таких операций в плавильных агрегатах.

Учитывая вышесказанное, можно констатировать, что направление диссертационного исследования является актуальным, чрезвычайно востребованным и перспективным.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы не вызывает сомнений, так как последние базируются на фундаментальных представлениях теории металлургических процессов и не противоречат известным научным фактам и литературным сведениям. Достоверность экспериментальных данных представляется убедительной, поскольку обусловлена комплексным характером исследований с использованием независимых экспериментальных методов, стандартных методик исследования, современного оборудования и специализированного программного обеспечения, что в целом обеспечивается сходимостью результатов экспериментов. Теоретические и практические результаты диссертации не вызывают возражений, безусловно обладают научной новизной и являются существенными, ранее не известными из литературных источников, научными фактами. Новизна предлагаемых автором технических решений, в том числе подтверждается полученными патентами.

Анализ структуры и содержания диссертации

Диссертация изложена на 330 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, включает 70 рисунков и 39 таблиц, списка литературы из 379 наименований и 10 приложений. Представлен автореферат объёмом 47 страниц, изданный на правах рукописи.

По структуре и объёму работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Диссертация написана научным языком и стилем, содержит весь необходимый материал для понимания сущности исследования. Полученные результаты отвечают поставленным целям и задачам. В представленном соискателем автореферате достаточно полно раскрыто содержание диссертационной работы, при одновременном сохранении её структурного построения, а, опубликованные работы и монографии, в достаточной мере отражают её содержание.

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности научной проблемы, сформулированы цели исследования и указаны основные задачи для её достижения, предоставлена научная, теоретическая и практическая значимость, описание методологии и методов исследования, обозначены положения, выносимые на защиту, приведены данные об апробации, публикациях и структуре диссертации.

В первой главе проанализированы основные направления ковшовой обработки расплава, в том числе организации температурного режима обработки в АКООС, раскисления стали, особенности образования неметаллических включений, микролегирование, модифицирование, инокулирование металла, вакуумирование стали, особенности организации десульфурации и перемешивания расплава в сталеразливочном ковше. Отмечается, что для разработки и оптимизации комплексной ковшовой обработки стали необходимо исследовать свойства ковшевых шлаков, и определить их десульфурующие свойства с целью достижения максимальных результатов и рациональных расходов шлакообразующих материалов. Проанализированы известные работы по исследованию влияния шлака на износ футеровки ковша, выполнено обоснование формирования рационального состава шлаков, обладающих максимальными десульфурующими свойствами. Проанализированы литературные данные по исследованию механизмов удаления примесей из расплава при пониженном давлении, в том числе в циркуляционном вакууматоре.

Необходимо отметить, что материалы, представленные в первой главе, позволяют судить об обоснованности и целесообразности постановки задач исследования.

Во второй главе приводятся результаты исследований по определению рационального химического состава шлаков в АКП, обеспечивающих максимально возможную десульфурацию металла. Для определения необходимых свойств шлакового расплава автор вводит понятия «показателя основности», «коэффициента взаимодействия», характеризующего поведение амфотерного оксида Al_2O_3 , исследует характеристики гомогенного и гетерогенного состояния шлака при различных вариантах раскисления металла.

Проведённые комплексные исследования позволили оптимизировать процесс шлакообразования в целом и снизить расход необходимых материалов, присаживаемых в стальной ковш на АКП. Полученные результаты подтверждены соответствующим актом промышленного внедрения.

В третьей главе представлены результаты исследований механизма удаления водорода и углерода, как элемента, образующего газообразный продукт реакции пузырь $\{CO\}$ для условий циркуляционного вакуумирования металла. Определено, что основным параметром процесса, определяющим удаление водорода и углерода (при концентрации углерода менее 0,003 – 0,006%), является площадь контакта пузырей нейтрального газа с металлом при подаче газа во впускной патрубок. Как установлено, данный параметр зависит от скорости циркуляции расплава, количества подаваемого в патрубок транспортирующего газа и внутреннего диаметра впускного патрубка. При этом получение необходимых сведений и достижение оптимальных показателей предопределяет необходимость проведения исследований по определению рациональной конструкции вакуумной камеры.

Четвёртая глава посвящена представлению результатов физического моделирования процесса на специально созданной лабораторной установке агрегата циркуляционного вакуумирования. Выполненные исследования позволили теоретически обосновать основные взаимосвязи между технологическими и конструктивными параметрами установки, что позволило

в дальнейших исследованиях обеспечить высокие эксплуатационные показатели процесса.

В пятой главе представлены результаты исследования технологических параметров обработки стали в циркуляционном вакууматоре при получении ультранизкого содержания углерода (менее 0,002%) в металле. Теоретическими расчётами определены рациональные конструкционные параметры 160-тонного циркуляционного вакууматора. Соискатель делает вывод, что для достижения минимального остаточного содержания углерода необходимо обеспечить внутренний диаметр впускного патрубка (как одного из основных узлов установки) в определённом диапазоне. Причём установленные характеристики, должны обеспечивать устойчивые показатели работы установки в течение всей кампании плавки с учётом характерного износа футеровки вакуумной камеры. Полученные теоретические показатели были подтверждены на промышленных плавках и представлены в Акте испытаний.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.2. «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов», в частности, по пункту 2. «Твёрдое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных и смешанных систем», пункту 4. «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», пункту 12. «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах», пункту 13. «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах», пункту 21. «Внепечная обработка металлов» и пункту 25. «Производство особо чистых металлов и сплавов» паспорта специальности.

Научная новизна работы

1. Разработана методика оценки сульфидной ёмкости шлака, учитывающая взаимосвязь температуры и введённого параметра «показателя основности» в многокомпонентной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-}$ ($\text{FeO}+\text{MnO}<1,5$), а также влияние оксидов, проявляющих основные, кислотные свойства и амфотерного оксида Al_2O_3 .

2. Усовершенствована и создана методика оценки условий перехода ковшевого шлака АКП из гетерогенного в гомогенное состояние для многокомпонентных оксидных систем при различных температурах с учётом насыщения шлакового расплава CaO и MgO.

3. Разработан и обоснован новый подход в оценке влияния Al_2O_3 на десульфурирующие свойства шлаков АКП в зависимости от характеристик раскисления.

4. Определён химический состав шлака с максимальной сульфидной ёмкостью, позволяющей прогнозировать остаточное содержание серы в металле после ковшевого рафинирования с учётом использования шлакообразующих материалов без плавикового шпата.

5. На основании анализа механизмов дегазации металлического расплава предложена методика подбора рациональных технологических параметров процесса циркуляционного вакуумирования и конструкции вакуумной камеры.

6. Предложены и проанализированы основные механизмы удаления водорода и углерода при реализации технологии циркуляционного вакуумирования. Впервые определено, что при обработке металла по такой технологии основным параметром, определяющим степень удаления водорода и углерода (при его содержании в металле менее 0,003 - 0,006%) является площадь контакта пузырей нейтрального газа, подаваемого во впускной патрубок с расплавом.

Теоретическая и практическая значимость исследования

- Для условий АО «Евраз НТМК» с использованием разработанной методики определён рациональный состав ковшевого шлака, позволяющий снизить расход шлакообразующих материалов и оптимизировать параметры десульфурации металла по сравнению с плавками текущего производства при сохранении стойкости агрегатов АКОС.

- С использованием разработанных положений определены рациональные технологические и конструктивные параметры агрегатов циркуляционного вакуумирования для обработки сталеразливочных ковшей ёмкостью 140 - 180 и 300 - 370 т.

- Для циркуляционных вакууматоров различной ёмкости впервые определены обобщённые технологические параметры обработки металла, обеспечивающие достижение максимальных показателей за счёт оптимальных значений скорости циркуляции расплава, расхода транспортирующего газа и внутреннего диаметра подающих патрубков при получении особо низкоуглеродистой стали.

- Установлено, что износ футеровки вакуум-камеры влияет на технологические показатели вакуумирования стали. Так при износе футеровки впускного патрубка изменяется его внутренний диаметр, что приводит к изменению условий взаимодействия транспортирующего газа с расплавом и, соответственно, технологии вакуумирования в целом.

Разработанная рациональная конструкция впускного патрубка вакуумной камеры внедрена в производство с обеспечением повышения средней стойкости футеровки патрубка на 27%.

Подтверждение публикации основных результатов диссертации в научных изданиях

Материалы диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, а также достаточно полно опубликованы в научных журналах и сборниках. Основные результаты диссертационной работы представлены в 30 работах, в том числе в 16 научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, 14 в журналах, индексируемых в международной базе Scopus и Web of Science (WoS), 3 монографиях в соавторстве, получено 2 патента РФ на изобретения.

Замечания по диссертационной работе Метелкина А.А.

Несмотря на общее положительное впечатление от работы с нашей точки зрения имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Вызывает неоднозначное отношение к не совсем удачному названию диссертационной работы: «Развитие технологических основ комплексной ковшевой обработки расплава после выпуска из сталеплавильного агрегата». А что разве возможна ковшевая обработка расплава в сталеплавильном агрегате?

Совершенно очевидно, что если это ковшевая обработка, то это после выпуска из сталеплавильного агрегата. Если же автор имеет ввиду использование известных и достаточно эффективных методов внепечной десульфурации чугуна в ковшах до поступления расплава в сталеплавильный агрегат, то в тексте диссертации ни в одном из разделов такой информации нет. Вместе с тем вопросы внепечной десульфурации чугуна при ковшевой обработке расплава, только усилили бы возможность получения положительных технологических результатов и комплексность подхода при решении важной и значимой проблемы.

2. В соответствии с информацией, представленной в автореферате и самом тексте диссертации, работа выполнена в Институте новых материалов и технологий ФГАОУ «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Тем не менее, ни в тексте автореферата, ни в самой диссертации полностью отсутствует информация в соответствии с какими государственными заданиями в сфере научной деятельности или в соответствии с какими планами научно-исследовательских работ указанной организации, какими грантами, данная диссертация выполнялась. Следует ли считать, что отсутствие такой информации позволяет рассматривать выполненную диссертационную работу как просто инициативную?

3. Представляется сомнительным и не рациональным заявленное решение проблемы по разработке технологических и конструктивных параметров вакуумных камер различной ёмкости (Автореферат. Научная новизна работы, п. 5, стр. 5; теоретическая и практическая значимость исследования, стр. 6, п.п. 2 и 4; диссертация гл. 4.3).

В следствие многолетних исследований и оптимизации конструкций вакуумных камер такого типа, известные подходы при определении параметров, как правило, реализуются на основе методик расчёта типовых характеристик газлифтов (например: Внепечное рафинирование стали в газлифтах / Ефимов С.П., Мачикин В.И., Лифенко Н.Г. – М.: Metallurgia, 1986. – 264 с.), поскольку подающий патрубок вакуумной камеры при вдувании

в него аргона представляет собой ни что иное, как характерный газлифт, т.е. газовый подъёмник жидкости за счёт энергии предварительно сжатого газа.

В основу такой методики определения конструктивных параметров вакуумной камеры заложен анализ классической расходной характеристики газлифта с определением оптимального режима с максимально возможной производительностью.

Такой подход позволяет построить газлифтовые характеристики вакуумных установок для обработки плавки заданной массы и по известным стандартным номограммам определять рациональные конструктивные параметры – диаметр подающего патрубка, расход аргона, глубину погружения патрубка в металл, кратность циркуляции и т.д.

4. В диссертационной работе (глава 4, стр. 162-172) представлены результаты оригинальных исследований, выполненных методами физического моделирования, что позволило автору получить интересную экспериментальную информацию по изучению процессов массопереноса в системе и определить рациональные технологические параметры при циркуляционном вакуумировании.

Не вызывают сомнения возможности получения в лабораторных условиях значительного объёма информации, которая в дальнейшем может привести к новым технологическим и конструктивным решениям и исключить хорошо известный металлургам метод «проб и ошибок».

В то же время при постановке таких экспериментов на моделях абсолютно необходимо соблюдение подобия изучаемых процессов с процессами, происходящими в натуральных условиях. В данном случае соблюдение геометрического и физического подобия совершенно недостаточно и, следовало бы более детально воспользоваться использованием известных методов теории подобия (например: Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. – М: Металлургия, 1984. – 118 с.). Так, например, при изучении процессов гидродинамики использовать критерии подобия или их комбинации, например, чисел Фруда, Рейнольдса, Эйлера, а

при изучении процессов массопереноса при движении потока - чисел Шервуда или Шмидта.

5. Рассматривая механизм обезуглероживания при получении ультранизкого содержания углерода в стали (глава 5, стр.195 или автореферат стр. 25) при определении места возможного развития реакции, используется известная терминология и отмечается возможность зарождения пузырей {CO} в глубине металлического расплава при их дальнейшем всплывании. В то же время следует отметить, что согласно современным представлениям, спонтанное (самопроизвольное) зарождение пузырей {CO} в объёме гомогенного расплава невозможно по следующим причинам:

- для протекания реакции необходимо иметь своеобразные разрывы (неспокошности) металла, т.е. необходимо преодолевать силы когезии, огромные по своей величине;

- либо необходимо иметь готовые зародыши пузырей {CO} (т.е. своеобразную «подложку»), например, активные поры на поверхности футеровки или других поверхностях раздела в расплаве для развития и отрыва таких пузырей при достижении критического радиуса.

6. Не понятно зачем в раздел «Заключение и основные выводы по работе» выносить полученные автором, безусловно интересные, расчётные формулы, например, по определению зависимости сульфитной ёмкости гомогенных и гетерогенных шлаков от температуры (п.п. 2 заключения, стр 229-230).

7. С нашей точки зрения, представленный раздел «литературный обзор и постановка задач исследования» (глава 1) несколько завышен по объёму (60 стр. из 234 страниц машинописного текста). При этом автор, в дальнейших уже исследовательских главах, позволяет себе опять периодически возвращаться к анализу литературных данных (например, раздел 2.2.7, стр. 89-94), что совершенно недопустимо.

8. Не совсем понятна структура и объём раздела «Приложения» к диссертации. Несмотря на отсутствие ограничений по объёму данного раздела в нормативных документах ВАК, всё же представленные материалы должны прежде всего характеризовать экономическую эффективность разработок

автора при внедрении работы в промышленности, их внедрении в учебный процесс и т.д. В то же время, представленные акты внедрения, акты испытаний не понятно почему полностью исключают данную информацию. Неужели, например, достигнутые результаты по снижению расхода шлакообразующих материалов, повышению стойкости футеровки циркуляционных вакууматоров не приводят к снижению материальных затрат?

9. Представленная в работе информация по объёму выполненных промышленных экспериментальных исследований не позволяет сделать однозначные выводы о представительности полученных результатов (например, стр. 227 – 5 плавов; стр. 113 – 11 ковшей; обработано 400 плавов – и не совсем понятно, какое участие и отношение к ним имеет автор). Такие формулировки ставят под сомнение фактор завершенности работ. Можно предположить, что для получения более достоверных данных, требуется дальнейшее проведение экспериментов и формирование более представительного массива результатов эксперимента?

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней»

Указанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость представленной диссертационной работы Метелкина Анатолия Алексеевича, направленную на решение важной отраслевой и даже государственной проблемы.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей пути решения важной практической задачи по созданию научно обоснованных технологий ковшевой металлургии.

Диссертационная работа и автореферат находятся в полном соответствии и по содержанию отвечают паспорту специальности 2.6.2 – Металлургия чёрных, цветных и редких металлов. Опубликованные работы, в том числе в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК, монографии, а также автореферат достаточно полно отражают содержание диссертации.

В целом диссертационная работа Метелкина А.А. «Развитие технологических основ комплексной ковшевой обработки расплава после

выпуска из сталеплавильного агрегата», представленная на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор Метелкин Анатолий Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии
чёрных металлов и химической
технологии ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный
университет»

«15» 04 2024 г

Протопопов Евгений Валентинович

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул.
Кирова, зд. 42.

Тел.: 8-905-901-9292

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

Я, Протопопов Евгений Валентинович, согласен на автоматизированную
обработку персональных данных, приведённых в этом документе

Подпись Протопопова Е.В. удостоверяю:

Начальник отдела кадров СибГИУ

Т.А. Миронова