

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Чуманова Ильи Валерьевича
на диссертационную работу Метёлкина 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 исследования

В настоящее время современные металлургические предприятия заинтересованы в выплавке высококачественных сталей с заданным содержанием вредных примесей и минимальными удельными затратами в том числе и на участке ковшевой обработки стали.

На участке ковшевой обработки стали (КОС) осуществляется легирование расплава путем добавки различных ферросплавов, а также удаление вредных примесей, таких как серы и растворенных газов.

При массовой выплавке стали удаление серы осуществляется в агрегате «ковш-печь» (АКП) путем перевода данного элемента в шлак. Для этого в сталеразливочном ковше формируют высокоосновные, жидкоподвижные шлаки состоящие из оксидной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, при незначительной (менее 1,5 %) концентрации других оксидов и сульфидов. В шлаках содержатся оксиды, имеющие октаэдрическую структуру и проявляющие основные свойства CaO и MgO , также присутствуют оксиды имеющие тетраэдрическую структуру и проявляющие кислотные свойства SiO_2 , дополнительно в шлаках присутствует амфотерный оксид Al_2O_3 , который может проявлять, как кислотные, так и основные свойства. Таким образом, для достижения требуемых концентраций серы в металле необходимо изучить поведение амфотерного оксида алюминия и формировать шлаки с заданными десульфуряющими свойствами. Дополнительной задачей является изучение разрушающих свойств оксидного расплава на футеровку агрегатов ковшевой обработки стали (АКОС). Таким образом, при изучении вопроса удаления серы необходим комплексный подход, направленный на изучение условий десульфурации и оценки агрессивности шлака к огнеупорным материалам участка КОС.

Вакууматоры циркуляционного типа являются важными металлургическими агрегатами, обеспечивающих повышение качества стали путем удаления растворенных газов, например, водорода. В данном металлургическом агрегате осуществляется комплексная обработка стали, как вакуумом, так и продувкой инертным газом. Основной задачей циркуляционного вакууматора является достижение требуемой концентрации водорода (менее 0,0002 %) и, в некоторых случаях, ультранизкого содержания углерода (менее 0,002 %). Поэтому необходимо определить основные механизмы дегазации и декарбонизации расплава и выявить взаимосвязь между

технологическими и конструкционными параметров циркуляционного вакууматора.

Таким образом, необходимо изучить вопросы удаления примесей на участке КОС с рациональными технологическими параметрами, обеспечивающими необходимый химический состав расплава при пониженном расходе материальных ресурсов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы сомнений не вызывает, так как они базируются на фундаментальных представлениях теории металлургических процессов и не противоречат известным научным фактам и литературным данным. Достоверность экспериментальных данных представляется убедительной, поскольку обусловлена комплексным характером исследований с использованием независимых экспериментальных методов, стандартных методик исследования, современного оборудования и специализированного программного обеспечения, подтверждается сходимостью результатов экспериментов. В целом 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 подтверждается полученными патентами.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обусловлена:

1. Использованием сертифицированных современных физико-химических методик исследования и методов анализа, подтверждением полученных результатов и выводов, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, применением методов математической статистики для систематизации экспериментальных данных;

2. Стабильностью экспериментальных данных о повышении технико-экономических показателей при формировании шлака в агрегате «ковш-печь». Предложенная технология прошла промышленное опробование и внедрена в конвертерном цехе АО ЕВРАЗ НТМК;

3. Получением требуемого содержания углерода при обработке расплава в циркуляционном вакууматоре. Технология прошла промышленное опробование в конвертерном цехе АО ЕВРАЗ НТМК;

4. Повышением времени эксплуатации циркуляционного вакууматора. Разработанная конструкция металлургического агрегата внедрена в конвертерном цехе АО ЕВРАЗ НТМК. Результаты подтверждаются утвержденными актами промышленного внедрения и актом промышленных испытаний.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация изложена на 330 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 10 приложений. Список литературы включает 379 наименования. Имеются ссылки как на работы отечественных, так и зарубежных ученых.

По структуре и объему 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 ее структурного построения, опубликованные работы также в достаточной мере отражают ее содержание.

Во введении автором обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулирована цель исследования и указаны его задачи, описана научная, теоретическая и практическая значимость, обозначены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы литературные источники по вопросам КОС, а именно организации температурного режима, раскисления стали, удаления неметаллических включений, десульфурации стали, перемешиванию расплава в сталеразливочном ковше и вакуумирования расплава в АКОС. Исходя из литературного обзора, выбраны направления исследований, а именно изучение десульфурующих свойств расплава в зависимости от состава шлака с целью достижения необходимого или требуемого содержания вредных примесей, с одновременным решением вопроса снижения агрессивности шлака к футеровкам АКОС. Также, с целью определения рациональных технологических параметров обработки стали в циркуляционном вакууматоре, необходимо исследовать механизмы удаления примесей из расплава при пониженном давлении.

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

Во второй главе автор изучает вопросы по удалению серы в агрегате ковш-печь (АКП) путем перевода данного элемента в шлак. Десульфурующие свойства оксидного расплава определяются наличием «свободных» анионов кислорода. В шлаках, формируемых в АКП, существуют оксиды, являющиеся донорами «свободных» анионов кислорода CaO и MgO и поглотителями «свободных» анионов кислорода SiO_2 , дополнительно содержатся амфотерный оксид алюминия, который может проявлять, как основные, так и кислотные свойства. Поэтому, автором были проведены лабораторные опыты по определению свойств амфотерного оксида Al_2O_3 в зависимости от химического состава шлака. С помощью лабораторных опытов было показано, что при концентрации до 16 % данный оксид проявляет основные свойства, а при повышении концентрации оксида алюминия более 16 % он начинает изменять свои свойства на кислотные. Полученные в

лабораторных экспериментах данные были подтверждены на промышленных плавках. Дополнительно для определения десульфуризирующих свойств шлака был введен параметр «показатель основности», который учитывает влияние амфотерного оксида Al_2O_3 на рафинировочные свойства шлака. Через параметр «показатель основности» были определены рациональные составы шлаков, по различным технологиям раскисления стали, обладающих максимальными десульфуризирующими свойствами. С учетом определенных теоретических положений на промышленном предприятии был предложен состав шлака обладающего рациональными рафинировочными свойствами: ($CaO - 53,0 \pm 0,5$ %; $Al_2O_3 - 20,0 \pm 0,5$ %; $SiO_2 - 18,0 \pm 0,5$ %; $MgO - 8,0 \pm 0,5$ %; $(FeO + MnO) < 1,5$ %). Формирование высокоосновного, жидкоподвижного шлака позволило снизить расход шлакообразующих материалов, отдаваемых в сталеразливочный ковш. В период проведения испытаний (август – октябрь 2022 года) расход шлакообразующих материалов был снижен на 7,5 % (с 8,0 до 7,4 кг/т стали). Полученные результаты подтверждены Актом промышленного внедрения.

В третьей главе автором изучены механизмы удаления водорода и углерода в циркуляционном вакууматоре и установлены основные из них, способствующие удалению рассматриваемых примесей из расплава. Определено, что в циркуляционном вакууматоре основным параметром, определяющим удаление водорода и углерода (при его содержании менее 0,003–0,006 %) является площадь контакта пузырьков нейтрального газа ($S_{пуз}$), подаваемого во впускной патрубков, с расплавом металла. Данный параметр зависит от скорости циркуляции расплава (G), от количества подаваемого газа (Q) и внутреннего диаметра впускного патрубка (D_U). Для определения взаимосвязей между технологическими и конструкционными параметрами в циркуляционном вакууматоре автором указана необходимость проведения дополнительных исследований, при которых достигается максимальная площадь контакта $S_{пуз}$ и, соответственно, максимальная скорость удаления примесей.

В четвертой главе представлены исследования по определению рациональных конструкционных и технологических параметров циркуляционного вакууматора. Для этого была создана физическая модель циркуляционного вакууматора. Было проведено несколько опытов с различным диаметром патрубков и расходом нейтрального газа. В результате получены формулы, описывающие взаимосвязи между технологическими и конструкционными параметрами циркуляционного вакууматора. Полученные закономерности позволили усовершенствовать конструкцию одного из элемента вакуум-камеры, а именно впускного патрубка. Опытные вакуум-камеры с рекомендованными размерами футеровки показали повышение средней стойкости футеровки на 27 % (с 116,09 до 147,57 плавов). На данную конструкцию патрубков получен патент РФ.

В пятой главе автором представлены рациональные технологические и конструкционные параметры обработки стали в циркуляционном вакууматоре, позволяющие достигать ультранизкого содержания углерода (менее 0,002 %) в

металле. По теоретическим расчетам определены рациональные технологические конструкционные параметры 160-тонного циркуляционного вакууматора. Для достижения минимального остаточного содержания углерода необходимо обеспечить внутренний диаметр впускного патрубка в диапазоне от 0,43 до 0,46 м при расходе аргона 1100 л/мин. Однако в процессе эксплуатации футеровка вакуум-камеры изнашивается, что приводит к увеличению внутреннего диаметра (D_{in}). Это необходимо учитывать для достижения минимальных значений по остаточному содержанию углерода в расплаве. Полученные теоретические показатели были подтверждены на промышленных плавках и представлены в Акте испытаний.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals, in particular, directions of researches by point 2 «Твердое 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

В диссертации представлена методика оценки сульфидной емкости шлака, учитывающая взаимосвязь температуры и введенного параметра показателя основности в многокомпонентной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-(FeO+MnO < 1,5)}$, а также влияние оксидов, проявляющих основные, кислотные свойства и амфотерного оксида Al_2O_3 . Проведена оценка поведения оксида алюминия в шлаке, формируемом в агрегате ковш-печь (АКП). Показано, что при повышении Al_2O_3 в оксидном расплаве в АКП, данный оксид начинает проявлять кислотные свойства.

Определена зависимость между составом шлака, обладающего максимальной сульфидной емкостью и менее агрессивного по отношению к футеровке агрегата, позволяющая точно прогнозировать остаточное содержание серы в металле после обработки в агрегатах ковшевой обработки стали в зависимости, от количества шлакообразующих материалов, для групп марок сталей без использования CaF_2 .

На основании анализа механизмов дегазации металлических расплавов автором разработана методика определения рациональных технологических параметров процесса вакуумирования и конструкций вакуум-камер.

Предложены основные механизмы удаления водорода и углерода (через образование газообразных продуктов раскисления) в циркуляционном вакууматоре – из глубины расплава в вакуум-камере и в пузырьки нейтрального газа, подаваемого во впускной патрубок. Впервые определено, что в циркуляционном вакууматоре основным параметром, определяющим удаление водорода и углерода (при его содержании менее 0,003–0,006 %) является

площадь контакта пузырьков нейтрального газа ($S_{\text{пуз}}$), подаваемого во впускной патрубок, с расплавом металла.

Теоретическая и практическая значимость работы

Согласно разработанной методике в условиях АО ЕВРАЗ НТМК определен состав шлака, обладающий необходимыми десульфуризирующими свойствами: $\text{CaO} - 53,0 \pm 0,5 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 20,0 \pm 0,5 \%$; $\text{SiO}_2 - 18,0 \pm 0,5 \%$; $\text{MgO} - 8,0 \pm 0,5 \%$; $(\text{FeO} + \text{MnO}) < 1,5 \%$. Формирование шлака с указанным химическим составом позволило снизить расход шлакообразующих материалов, отдаваемых в сталеразливочный ковш, на 7,5 % (с 8,0 до 7,4 кг/т стали) при выплавке групп марок сталей, без использования CaF_2 , и повысить степень десульфурации на 14 % по сравнению с серийными плавками. Стойкость футеровки агрегатов АКЭС при использовании указанного шлака не изменяется.

Определены технологические и конструкционные параметры реальных металлургических агрегатов для обработки расплава вакуумом в зависимости от емкостей сталеразливочных ковшей 140–180 и 300–370 т.

Впервые определены технологические параметры обработки стали в циркуляционных вакууматорах различной емкости, обеспечивающие максимальное значение площади контакта пузырьков лифт-газа за счет рациональных значений скорости циркуляции расплава, количества подаваемого лифт-газа и внутреннего диаметра впускного патрубка.

На основании предложенной методики разработаны рекомендации для определения рациональных расходов транспортирующего нейтрального газа в зависимости от конструкции впускного патрубка – одного из элементов вакуум-камеры, позволяющие достигать содержания углерода в металле после вакуумирования менее 0,002 %.

Показано, что износ футеровки вакуум-камеры влияет на технологические параметры вакуумирования стали. При износе внутренней футеровки впускного патрубка изменяется его внутренний диаметр, что приводит к изменению параметра площади взаимодействия лифт-газа в расплаве и, соответственно, технологии вакуумирования.

Разработана и внедрена в производство рациональная конструкция впускного патрубка циркуляционного вакууматора. Опытные вакуум-камеры с рекомендованными размерами футеровки показали повышение средней стойкости футеровки на 27 % с 116,09 до 147,57 плавов.

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 в достаточной степени освещены в 30 работах, из них 16 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 14 в журналах,

индексируемых в международной базе *Scopus* и *Web of Science (WoS)*; 3 монографии в соавторстве; получено 2 патента РФ на изобретение.

Замечания и вопросы по диссертационной работе Метелкина А.А.

1. Автор в качестве научной новизны указывает, что «Установлен состав шлака, обладающий максимальной сульфидной емкостью и неагрессивный по отношению к футеровке агрегата, что позволило прогнозировать остаточное содержание серы в металле после обработки в АКП в зависимости от количества шлакообразующих материалов для групп марок сталей без использования CaF_2 » Также, в теоретической и практической значимости работы указано, что использование данного шлака позволило повысить степень десульфурации на 14 %. При этом ни в тексте диссертации, ни в автореферате не указываются данные, на основании которых было установлено данное значение, т.е. содержание серы до и после обработки стали на АКП шлаком, используемым на предприятии и предлагаемого состава.

2. Автором подробно рассмотрен вопрос удаления водорода и углерода в циркуляционном вакууматоре и предложен основной механизм удаления – через образование газообразных продуктов раскисления. Данное положение подкрепляется теоретическими и практическими расчетами, но только по изменению концентрации и скорости удаления углерода, однако результаты изменения концентрации и скорости удаления водорода не представлены.

3. Продолжением предыдущего вопроса является следующий: в работе не рассмотрены вопросы удаления азота при вакуумировании. Не влияет ли предложенный (представленный) состав рационального шлака на степень удаления азота при обработке в вакууматоре? Ведь сопутствующей задачей вакуумирования является удаление азота.

4. Автор использует понятие «рациональный» состав шлака. Большинство способов определения числовых показателей основаны на математических методах исследования – статистический анализ, оптимизация, теория вероятностей, построение математических моделей и т.д. Каким образом определяется данный параметр «рациональности» и что он в себя включает?

5. Рисунки 2.23 и 2.24 диссертационной работы не слишком информативны. Для лучшей визуализации полученных результатов внутри рисунков необходимо было привести пары графиков с единым масштабом оси ординат (L_s).

6. В тексте диссертации и автореферата не отражено, влияет ли каким-либо образом на степень удаления углерода при вакуумировании окисленность металла перед обработкой. Имеются ли данные по данному вопросу?

7. В работе приведены результаты исследований, свидетельствующие о том, что для образования защитного гарнисажа на огнеупорной футеровке необходимо повышать содержание MgO и Al_2O_3 в шлаке. Однако не рассмотрен вопрос, который может иметь место при реализации данного положения – будет ли в таком случае увеличиваться степень загрязненности металла шпинелью?

Заключение по диссертации

Несмотря на указанные замечания и вопросы, диссертационная работа Метелкина А.А. «Развитие технологических основ комплексной ковшевой обработки расплава после выпуска из сталеплавильного агрегата», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов отвечает требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор Метелкин Анатолий Алексеевич – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов» филиала ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте доктор технических наук, профессор специальность 05.16.02 «Metallургия черных, цветных и редких металлов»

Чуманов Илья Валерьевич
«17» 04 2024 г.

456200 г. Златоуст, ул. Тургенева, д.16

Филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Златоусте тел. +7(950)721-59-55

Эл. почта: *chumanoviv@susu.ru*

Я, Чуманов Илья Валерьевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе

Подпись Чуманова И.В. заверяю:

Начальник отдела делопроизводства филиала ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» в г. Златоусте

Л.А. Гузеева

