

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



Калиногорский Андрей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
НАНЕСЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФУТЕРОВКУ
БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛЮСОВ**

Специальность 05.16.02 - Metallurgy of black, colored and rare metals

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Заслуженный работник высшей школы
Е.В. Протопопов

Новокузнецк – 2016

Оглавление

Введение	4
1 Современное состояние теории и практики нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров.....	10
1.1 Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров.....	10
1.2 Преимущества и недостатки реализованных способов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку	20
1.3 Дутьевые устройства для выполнения горячих ремонтов футеровки кислородных конвертеров. Теоретические проблемы, основные требования и подходы для разработки конструкций и их эксплуатации	26
Постановка задач исследования	29
2 Изучение особенностей применения вихревых течений для оптимизации процесса нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегатов.....	29
2.1 Методика низкотемпературного моделирования процесса формирования огнеупорных покрытий на футеровке.....	32
2.2 Исследование аэрогидродинамики шлаковой ванны при использовании вихревых течений для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку.....	36
2.3 Исследование особенностей дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой.....	44
2.4 Исследование параметров движения капель шлака в рабочем пространстве конвертера	49
Выводы	54
3 Исследование и разработка рациональных параметров эксплуатации специальных дутьевых устройств для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку большегрузных конвертеров.....	56
3.1. Этапы разработок и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для проведения «горячих» ремонтов футеровки большегрузных конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	56

3.2 Проектирование системы охлаждения и расчет характеристик теплообмена газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы.....	69
3.3 Проектирование и расчет характеристик охлаждения и теплообмена газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы	83
Выводы	89
4 Исследование и совершенствование технологии продувки металла и нанесения огнеупорных покрытий с использованием высокомагнезиальных флюсов для условий эксплуатации большегрузных конвертеров ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	91
4.1 Исходные условия и методика проведения промышленных исследований ..	91
4.2 Исследование физико-химических параметров шлаков конвертерной плавки с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ	95
4.3 Исследование фазово-минералогических параметров конвертерных магнезиальных шлаков	99
4.4 Результаты разработки и совершенствования технологии продувки конвертерной ванны с использованием флюса ФОМИ	115
Выводы	120
Заключение	122
Список литературы	125
Приложения	144

Введение

Актуальность темы исследования.

Мировое производство стали в 2015 году составило ~ 1,60 млрд. т, при этом кислородно-конвертерный процесс занимает ведущую роль в структуре сталеплавильного производства. В соответствии с современными представлениями себестоимость конвертерной стали и производительность агрегатов в значительной степени определяются стойкостью футеровки и расходом огнеупоров. Поэтому проведение «горячих» ремонтов является важной составляющей службы эксплуатации футеровки, а технология нанесения шлакового гарнисажа рассматривается фактически как основное ресурсосберегающее мероприятие.

В настоящее время при выплавке стали в конвертерах широко используются высокомагнезиальные флюсы, что позволяет повысить содержание MgO в шлаке, снизить его агрессивное воздействие на футеровку и получить при раздувке подготовленного шлака огнеупорное защитное покрытие на футеровке. Однако при использовании высокомагнезиальных флюсов возникает целый ряд технологических проблем, связанных с ухудшением показателей шлакообразования и снижением рафинирующей способности конвертерных магнезиальных шлаков, особенно в большегрузных агрегатах.

В связи с этим разработка научных и технологических основ нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для отечественной металлургии.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации по заданию Минобрнауки России при грантовой поддержке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (НИР № ГР 01201459343).

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам снижения расхода огнеупорных материалов на производство стали уделяется большое внимание исследователей в отечественной и мировой науке. Многочисленные публикации по этой теме свидетельствуют о перспективности технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров, однако недостаточная научная проработка используемых в отрасли, особенно для большегрузных агрегатов, технологических режимов процесса не позволяет достичь мировых показателей по стойкости футеровки конвертеров. В данном случае возможным решением проблемы является разработка новых вариантов ресурсосберегающих технологий нанесения шлакового гарнисажа на футеровку агрегатов, обеспечивающих использование для раздувки гарнисажного шлака вихревых газовых и газопорошковых струй и применение высокостойких конструкций гарнисажных фурм с системой газового охлаждения дутьевого устройства.

Цели и задачи.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований процесса нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов разработать новые ресурсосберегающие технологии продления срока службы футеровки агрегатов с применением специальных дутьевых устройств для их реализации.

Основные задачи:

- выполнить экспериментальные и аналитические исследования нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородного конвертера вихревыми газовыми струями;
- исследовать характеристики теплообмена и научно обосновать газовое охлаждения специальных дутьевых устройств для раздувки шлакового расплава в 350-т агрегатах АО «ЕВРАЗ ЗСМК»;
- исследовать особенности процессов шлакообразования, рафинирования металла и растворения огнеупоров для совершенствования технологии нанесения

огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов;

– опробовать результаты теоретических и экспериментальных исследований в технологической практике производства стали и использовать их при подготовке студентов вузов, обучающихся по направлению 22.03.02 – Metallurgy.

Научная новизна.

1) Впервые установлен механизм и гидрогазодинамические режимы взаимодействия вихревых газовых струй со шлаковым расплавом. Изучены параметры движения капель шлака в объеме конвертера.

2) Определено оптимальное для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера соотношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, равное 0,2 – 1,0 отн. ед.

3) Разработана методика анализа теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера и выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата.

4) Определены температурные нагрузки на основные конструктивные элементы специальных дутьевых устройств при газовом охлаждении. Установлена возможность снижения при этом теплопередачи на внутренние элементы до 10 % от воспринимаемого теплового потока.

5) Определены фазовые и структурные превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса, концентрация насыщения шлака оксидом магния по периодам конвертерной плавки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1) Установлена принципиальная возможность и определены технологические преимущества раздувки шлакового расплава вихревыми газовыми струями для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров.

2) На основании исследования теплообменных процессов при использовании специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на

футеровку конвертеров обосновано их охлаждение азотом, подаваемым на раздувку шлака.

3) Разработанная техническая документация на систему газового охлаждения специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров передана к использованию в ККЦ № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

4) На основании исследований физико-химических характеристик конвертерных магнезиальных шлаков, установлено их соответствие требованиям к защитным огнеупорным покрытиям футеровки агрегатов.

5) На основании исследований кристаллохимических и кристаллофизических характеристик конвертерных магнезиальных шлаков определены технологические параметры шлакового режима конвертерной плавки с использованием высокомагнезиальных флюсов.

6) Разработаны и переданы к промышленному внедрению рекомендации по совершенствованию технологии выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ.

7) Полученные в работе научные и технологические результаты внедрены ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в учебный процесс студентов, обучающихся по направлению 22.03.02 – Metallurgy.

Методология и методы исследования.

Работа выполнена с привлечением комплекса современных теоретических и экспериментальных методов: физического моделирования, численного расчета раздувки шлака вихревыми газовыми струями и теплообмена в специальных дутьевых устройствах; исследования химического и фазово-минералогического составов, физических и технологических свойств шлаков и флюсов; проведения опытно-промышленных плавов в кислородных конвертерах с отбором проб металла и шлака; использования методов математической статистики и средств

вычислительной техники с применением стандартного пакета прикладных программ Microsoft Office.

Положения, выносимые на защиту.

1) Результаты исследования характеристик вихревых газовых струй и аэродинамических закономерностей процесса при раздувке шлакового расплава на футеровку агрегата.

2) Результаты исследования теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера для условий раздувки шлакового расплава с использованием известных конструкций специальных дутьевых устройств.

3) Технические предложения по газовому охлаждению специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата в условиях конвертерных цехов отрасли.

4) Результаты определения физико-химических характеристик шлака, выявленные фазовые и структурные превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезимального флюса по периодам конвертерной плавки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов по п. 6 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах»; п. 7 «Тепло и массоперенос в низко и высокотемпературных процессах»; п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных методов теоретического и экспериментального исследования процессов аэро-гидродинамики и тепломассообмена, качеством измерений их характеристик и статистической обработкой результатов; адекватностью разработанных математических моделей; применением широко распространенных разнообразных и апробированных методов анализа; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; результатами промышленного опробования и

высокой эффективностью предложенных решений.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийских научно-практических конференциях «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2013, 2014 гг.); XVIII Международном научном симпозиуме имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2014 г.); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Литье. Metallургия» (Украина г. Запорожье 2015 г.); IV Международной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии» (г. Екатеринбург, 2015 г.).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и двух приложений. Изложена на 146 страницах, содержит 28 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 164 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю работы, профессору кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктору технических наук Е.В. Протопопову, а также сотрудникам университета: д.т.н., профессору Н.Ф. Якушевичу, к.г.-м.н. А.А. Пермякову, к.т.н. В.И. Багрянцеву, оказавшим содействие на различных стадиях выполнения диссертационной работы.

1 Современное состояние теории и практики нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров

1.1 Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров

Стойкость футеровки кислородных конвертеров оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели процесса, поэтому ее повышению уделяется серьезное внимание. С одной стороны, увеличение длительности кампании конвертера позволяет снизить себестоимость стали за счет снижения удельного расхода огнеупоров на ее выплавку. С другой стороны, это требует использования более стойких огнеупорных материалов, либо поиска иных путей продления срока службы футеровки и, естественно, дополнительных расходов. Таким образом каждый производитель стали стремится подобрать оптимальный перечень технических и технологических мероприятий, позволяющих обеспечить максимальную стойкость футеровки при минимальных затратах на ее эксплуатацию.

Выплавка стали в кислородных конвертерах сопровождается образованием окислительных шлаков, которые оказывают разрушающее воздействие на футеровку агрегатов [1 – 31]. Агрессивное воздействие шлака в наибольшей степени проявляется в начале продувки, уменьшается в течение основного периода обезуглероживания и повышается к концу продувки, вследствие интенсификации процесса массопереноса в железистом шлаке, а также увеличения температуры ванны [11 – 21].

Отрицательное влияние оксидов железа, находящихся в шлаке, на стойкость основных огнеупоров объясняется тем, что при взаимодействии оксидов железа с огнеупорными изделиями при высоких температурах (более 1600 °С) в процессе кислородной продувки, вследствие развития в периклазоуглеродистых огнеупорах реакции $C + FeO = CO + Fe$, в футеровке образуются поры [32]. Наличие последних способствует проникновению шлака в обезуглероженный слой с

растворением огнеупорных составляющих – оксидов магния и кальция [13, 33 – 37]. При этом образующиеся восстановленные капли железа служат концентраторами напряжений в огнеупоре и приводят к механическому разрушению футеровки в результате изменения температуры в процессе продувки металла [24 – 29, 38].

Требования к стойкости футеровки кислородных конвертеров предопределили следующие мировые тенденции в применении огнеупоров: от использования смолосвязанных доломитовых, затем периклазодоломитовых и периклазовых, обожженных периклазовых, пропитанных смолой в вакууме, до огнеупоров периклазоуглеродистого состава, которые были разработаны в середине 80-ых годов XX века и широко применяются в настоящее время [39 – 43].

Ежегодно в мире производится более 6 млн. т периклаза преимущественно для огнеупорной промышленности. Используются марки периклаза, содержащие от 80 до 99 масс. % MgO в зависимости от области применения [41 – 49].

Месторождения магнезита распространены по всему миру, и периклаз производится во многих странах. Однако в последние годы производство периклаза претерпело серьезные изменения: западное производство высококачественного синтетического спеченного периклаза для огнеупорной промышленности значительно снизилось и было заменено на ввоз из Китая периклаза, произведенного из сырого магнезита. В результате этого на рынке плавленного периклаза стали доминировать китайские производители, и в настоящее время доля китайского плавленного периклаза составляет более 90 % всех поставок для огнеупорной промышленности [43 – 48].

Периклазоуглеродистые огнеупоры представляют собой изделия, сформованные под высоким давлением с применением специальной углеродистой связки из массы, содержащей магнезиальный клинкер, графит и различные модифицирующие добавки [38 – 51]. После формования изделия сушат при температуре около 300 °С в восстановительной среде с целью предотвращения окисления углерода. Поскольку периклаз и углерод не образуют эвтектическую

смесь, периклазоуглеродистые изделия имеют высокую огнеупорность. Повышенная теплопроводность и низкое термическое расширение углерода обеспечивают значительную термостойкость изделий. Кроме того, углерод предотвращает проникновение шлака в огнеупоры, что связывают с низкой его смачиваемостью шлаком и способностью восстанавливать оксиды железа в шлаке, повышая вязкость и температуру плавления шлака. При этом периклазоуглеродистые огнеупоры обладают повышенной, по сравнению со стандартными основными изделиями, шлакоустойчивостью, так как периклаз и углерод отличаются пониженной реакционной способностью по отношению к шлаку.

Повышению стойкости изделий способствует увеличение их высокотемпературной прочности, снижение скорости выгорания углерода, повышение коррозионной и эрозионной устойчивости по отношению к жидкому металлу. Для этого требуется:

- использование высокочистого плавленного периклаза или спеченного периклаза с крупными кристаллами (более 300 мкм, а для отдельных зон футеровки 300 – 1000 мкм) [44];

- использование качественного графита зольностью не более 4 %, а для ответственных зон футеровки не более 2 %;

- использование эффективных антиоксидантов, препятствующих окислению углерода огнеупора. Наиболее широко в практике российских и китайских предприятий используются металлический алюминий, сплав алюминия с магнием и карбид бора, а также их сочетание [50];

- применение комплексной органической связки, включающей термореактивный и термопластичный компоненты (последний – обычно пек или его производные), что способствует снижению внутренних напряжений в огнеупоре, повышению его термостойкости и соответственно устойчивости к скалыванию [46 – 49, 51].

– использование в производственном цикле высокоскоростных смесителей, вибрационных уплотнителей, гидравлических и ударных прессов, позволяющих получить давление до 160 МПа.

Периклазоуглеродистые материалы в зависимости от состава исходной шихты содержат 94 – 98 % MgO, содержание углерода (сверх 100 % огнеупорного материала) 10 – 25 %, плотность 2,88 – 3,06 кг/м³, открытая пористость 2,5 – 7,0 %, предел прочности при сжатии 35 – 63 МПа, температура начала деформации под нагрузкой составляет 1700 °С [49 – 51].

Протекающие в процессе продувки металла в конвертере, физико-химические и массообменные процессы способствуют неравномерному износу футеровки агрегата. Для восстановления изношенных участков огнеупорной кладки в течение кампании агрегата применяют различные методы «горячих» ремонтов футеровки.

Метод подварки, позаимствованный из опыта эксплуатации подовых агрегатов для производства стали, например мартеновских печей, заключается в том, что в конвертере оставляют от предыдущей плавки часть шлака высокой основности, но достаточной жидкоподвижности. Конвертер устанавливают таким образом, чтобы шлак заполнил места локального износа кладки, куда затем загружают бой огнеупорного кирпича, целые огнеупорные изделия невысокого качества или смесь из боя и целых изделий. Обломки кирпича частично пропитываются шлаком, вся масса затвердевает в течение 10 – 20 мин, после чего начинают следующую плавку. Наваренный слой, хотя и не обладает такой износоустойчивостью, как обычная футеровка, все же в течение нескольких плавов предохраняет от износа рабочий слой [40 – 53]. Однако использование описанного метода приводит к потерям рабочего времени, и он пригоден для ремонта только тех участков футеровки конвертера, которые находятся в плоскости его вращения, в частности, завалочной стороны, района сталевыпускного отверстия и под ним, а также днища. Такой ремонт целесообразно проводить при наличии значительного износа футеровки.

Количество подварок в течение кампании зависит от скорости износа огнеупорной футеровки и длительности кампании.

Торкретирование заключается в нанесении при помощи специальных торкрет-фурм огнеупорной массы на изношенные участки футеровки [21, 22, 42]. При полусухом способе увлажненную огнеупорную массу наносят на футеровку конвертера при помощи сопла-распылителя торкрет-машины струей сжатого воздуха. Увлажненная масса прилипает к футеровке, а в последующем приваривается к ней. Такой способ торкретирования чаще применяют при ремонте относительно небольших локальных разгаров футеровки. Это объясняется тем, что ремонт больших по площади участков футеровки занимает слишком много времени. Нанесенная толстым слоем торкрет-масса легко отслаивается и обрушивается, поэтому полусухой способ не рекомендуется применять для ремонта глубоких выбоин.

Факельное торкретирование отличается тем, что при помощи водоохлаждаемой фурмы в полость конвертера подают кислород и торкрет-массу, содержащую топливо (коксовую пыль). Сгорание кокса в кислороде обеспечивает формирование факела с температурой 1800-2000 °С. При этой температуре огнеупорный порошок оплавляется (переходит в пластичное состояние) и наносимый факелом на поверхность футеровки прочно сваривается с ней. При этом не требуется обжиг нанесенного покрытия [48 – 54].

Факельное торкретирование используют как для локального ремонта участков повышенного износа, так и всей поверхности футеровки. Длительность факельного торкретирования составляет 4-20 минут, периодичность 2-18 плавов. Толщина наносимого торкрет-покрытия составляет от 5 до 100 мм. Стойкость покрытия в зависимости от его толщины колеблется от 2 до 8 плавов.

Применение описанных способов «горячего» ремонта было predeterminedено интенсификацией металлургического производства и условиями службы огнеупоров. Однако такое направление увеличения стойкости футеровки кислородных конвертеров себя практически исчерпало, так как возрастающие

затраты на проведение ремонтов не компенсируют снижением расхода огнеупоров [33].

Альтернативным вариантом продления кампании агрегата является направление, связанное со снижением агрессивности шлака по отношению к огнеупорным изделиям и дальнейшим ошлакованием поверхности футеровки шлаковым расплавом.

Снижение агрессивного воздействия высокожелезистых шлаков на футеровку конвертеров достигается введением в плавку магнезиальных материалов [34 – 36].

В настоящее время известны «химическая» и «физическая» теории, описывающие механизм влияния оксида магния в основном шлаке на стойкость футеровки кислородного конвертера [11, 13, 34, 35].

Согласно «химической» теории [34], замедление коррозионного износа футеровки обусловлено уменьшением градиента активности MgO на границе раздела шлак-футеровка, а отсутствие износа футеровки может быть достигнуто только при условии насыщения основного шлака оксидом магния. С точки зрения положений «физической» теории [35], положительное влияние ввода MgO в шлак на стойкость футеровки связано, прежде всего, с изменением физических характеристик шлака и образованием защитного шлакового гарнисажа, который препятствует разрушению футеровки шлаковым расплавом в течение последующей плавки. Есть мнение [13], что обе концепции отражают один и тот же механизм процесса с различных точек зрения.

В кислородно-конвертерных цехах еще до широкого распространения технологии раздувки шлака на футеровку был накоплен значительный опыт применения в течение основного времени продувки MgO -содержащих материалов, прежде всего мягкообожженного доломита и доломитизированной извести.

Впервые мягкообожженный доломит с содержанием оксида магния 35 – 40 % был применен в США в 1963 г. [10, 26, 55, 56]. На металлургических заводах Японии разработанная технология конвертерной плавки предполагала увеличение

расхода мягкообожженного доломита с 10 до 30 кг/т стали, что позволило наряду с профилактическим торкретированием периклазоуглеродистой футеровки повысить стойкость 250-т и 300-т конвертеров до 5000-10000 плавов [26, 30].

В странах Западной Европы, и в частности в Германии, технология наведения шлака с высоким содержанием MgO в кислородных конвертерах была опробована позже [27 – 30]. На заводах фирмы «Штальверке Пайне-Зальцгиттер» был разработан вариант технологии продувки металла с применением мягкообожженного доломита [28, 31]. Насыщение шлака достигалось в результате оставления в конвертере части конечного шлака и изменения режима ввода извести и доломита. При расходе обожженного доломита 16-22 кг/т стали (содержание MgO в шлаке 6-9%) были достигнуты достаточно высокие показатели стойкости доломитовой футеровки (до 1600 плавов) [31].

На эффективность известных технологий значительное влияние оказывают физико-химические характеристики обожженного доломита, которые во многом определяются применяемым режимом обжига. Установлено, что при использовании в качестве флюса твердообожженного доломита (обжиг при 1350 °C) стойкость футеровки может быть повышена лишь на 5%, в то время как применение мягкообожженного доломита (обжиг при 1150 °C) обеспечивает повышение стойкости на 50% [28].

Большое влияние на показатели стойкости также оказывает фракционный состав присаживаемых магнезиальных материалов. Преимущество использования, в частности, мелкозернистого мягкообожженного доломита (20-30% фракции менее 6 мм) по сравнению с предварительно сортированным (фракцией более 6 мм) доказано рядом промышленных исследований [10, 57]. Было установлено, что порошкообразный мягкообожженный доломит или каустический магнезит (полуобожженный магнезит) при подаче через фурму совместно с кислородом обеспечивает ускоренный прирост содержания оксида магния в шлаке по сравнению с традиционной технологией подачи по тракту сыпучих материалов, благодаря чему износ футеровки снижается настолько, что

вообще отпадает необходимость в проведении иных видов «горячих» ремонтов огнеупорной кладки [10, 28].

Вместе с тем, при использовании обожженного доломита отмечается гетерогенизация шлакового расплава с повышением его вязкости несмотря на наличие в шлаковом расплаве оксидов железа [32, 57]. Продувка металла при наличии таких шлаков сопровождается ухудшением процессов массопереноса, дефосфорации и десульфурации расплава, а также снижением технико-экономических показателей.

В этой связи более эффективно использование ожеженного доломита [33, 56, 57]. Применение доломита, содержащего 30% Fe и 20% MgO, на заводе фирмы «Алгома стил» (Канада) позволило в середине семидесятых годов прошлого века повысить стойкость футеровки еще на 550-600 плавов (~47 %) [58].

Следует иметь в виду, что используемые в конвертерном производстве различные виды доломита не обеспечивают формирование качественного защитного покрытия при раздувке шлака.

Это положение можно объяснить с позиции молекулярной теории шлаков [59 – 68]. Использование в начальный период плавки (при низкой основности шлака) доломита и его аналогов приводит к образованию легкоплавких MgO-содержащих силикатов, таких как монтчеллит $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (температура плавления 1430 °C) и мервинит $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (1575 °C). Оксиды железа Fe_2O_3 и FeO в этот период взаимодействуют с оксидом MgO и образуют магнезиоферрит $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1713 °C) и твердый раствор магнезиовюститита $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ [49 – 73]. Таким образом, происходит потеря оксида кальция как рафинирующего агента, а оксид магния, образуя огнеупорную фазу в шлаке, повышает его вязкость, что неблагоприятно в начальный период плавки. При повышении основности шлака более 2, в период полного растворения извести, практически весь оксид Fe_2O_3 находится в виде легкоплавкого двухкальциевого феррита $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1449 °C), проходят реакции замещения ферритов магния на ферриты кальция, а силикаты в этом случае образуют соединения $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Таким образом, загущение шлака при введении оксида магния в плавку не происходит.

В конце плавки, когда весь оксид кальция полностью прореагировал, и шлакообразование практически закончилось, введение высокомагнезиальных материалов позволяет синтезировать огнеупорную фазу, во-первых, в условиях повышенной окисленности шлака и, во-вторых, благодаря вводимым специальным добавкам. Практически единственной огнеупорной фазой в системе $\text{MgO} - \text{FeO}$ является непрерывный ряд твердого раствора магнезиевюстита, в окисленной форме – магнезиоферрита с температурой плавления выше 1700°C . Наличие избыточного количества оксидов железа и отсутствие свободного оксида кальция в шлаковом расплаве – необходимые условия образования вязкого высокотемпературного шлака [69 – 73].

В связи с этим наблюдается тенденция замены доломита и его аналогов высокомагнезиальными флюсами (см. таблица 1.1). Производство этих материалов основано на использовании MgO -содержащего компонента. Первоначальным источником оксида магния служит, как правило, магнезиальное сырье (природные магнезиты, бруситы и др.), которое в процессе производства обжигается совместно с присадками при температуре $1300 - 1450^\circ\text{C}$ [47 – 62].

Таблица 1.1 – Характеристика высокомагнезиальных флюсов

Наименование	Содержание основных компонентов, %			
	MgO	CaO	Fe_2O_3	SiO_2
ИМФ-30	30 – 35	48 – 52	7 – 11	2 – 5
ФОМ	80 – 90	1,5 – 3,0	6 – 12	1,5 – 3,5
ФМБУЖ	> 70	< 5	4 – 8	4 – 8
ФОМИ	>66	12 – 22	4 – 8	<5
ММШ-1	>55	<6	<1	<6
ФМ-1	>80	<7	<1	<7

Например, применение известково-магнезиального флюса (ИМФ-30) позволяет достаточно быстро увеличивать концентрацию MgO в конвертерном шлаке, по сравнению с использованием доломита. Однако, вследствие высокого содержания CaO в флюсе, использование этого материала в конвертерной плавке приводит к образованию в шлаке низкотемпературных ферритов кальция с температурами плавления $1400-1415^\circ\text{C}$ что приводит к снижению его вязкости

при нанесении гарнисажа. Необходимо также отметить, что оксид кальция в процессе транспортировки флюса гидратирует с образованием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и снижает прочностные характеристики флюса, увеличивает количество мелочи и, соответственно, вынос [49].

В отличие от ИМФ-30 флюс ожеженный магниальный (ФОМ) можно использовать и для подготовки шлака к раздувке, благодаря низкому содержанию CaO . В целом при использовании ФОМ отмечается снижение агрессивного воздействия шлака на футеровку конвертера, что, видимо, связано с быстрым увеличением концентрации MgO в шлаке [47, 49].

Использование флюса магниального брикетированного, содержащего углерод и оксиды железа (ФМБУЖ) позволяет снизить размыв футеровки в начале плавки, что обусловлено высокой скоростью растворения последнего, по сравнению с результатами, полученными при использовании флюса ФОМ [63]. Однако высокомагниальный флюс ФМБУЖ характеризуется высоким содержанием серы (0,3-0,55%), что негативно отражается на процессе десульфурации и, соответственно, показателях качества металлопродукции.

Кроме того в практике нанесения шлакового гарнисажа нашли широкое применение высокомагниальные флюсы с повышенным содержанием потерь при прокаливании ($\Delta m_{\text{прк}}$) – модификаторы шлака. Принцип их работы основан на моментальном саморазрушении гранул гидрокарбонатов магния при попадании их в зону высоких температур (выше 1400 °C). Образующиеся в результате этого частицы активного оксида магния, обладающие высокой (до 50 м²/г) удельной поверхностью, при наличии свободных оксидов железа с большой скоростью образуют огнеупорную фазу. Процесс декарбонизации и дегидратации магниальных гранул имеет эндотермический эффект, и температура шлака несколько снижается [47, 60].

Практика использования модификаторов показывает, что наиболее рационально вводить гранулы в конвертер в конце продувки, либо непосредственно на шлак перед его раздувкой, чтобы не нарушать процесс рафинирования металла [67].

В состав некоторых модификаторов в качестве добавок вводится углеродсодержащий материал, который позволяет провести в шлаковом расплаве химические реакции разложения ферритов кальция и оксидов железа, а также компенсировать снижение температуры ванны.

Расход магнезиальных материалов определяется количеством MgO в них, а также регламентированным содержанием магнезии в конвертерном шлаке. Кроме того, магнезиальные материалы вводят в шлак и после выпуска металла с целью придания ему необходимых физико-химических характеристик для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. Таким образом шлаковый расплав непосредственно перед раздувкой на футеровку агрегата представляет собой суспензию с не растворившимися зернами периклаза. При ее охлаждении эти зерна выступают в качестве центров начальной кристаллизации, а также, взаимодействуя с шлаковым расплавом в процессе затвердевания, увеличивают температуру плавления гарнисажа [68].

1.2 Преимущества и недостатки реализованных способов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку

Для повышения стойкости предложено смачивать футеровку кислородного конвертера конечным шлаком. Для покрытия шлаком максимально возможной площади огнеупорной кладки на первом этапе использовали покачивание конвертера [55 – 58, 74].

Поскольку в конвертере имеются локальные области с повышенным износом футеровки, например, в районе цапф и верхнего конуса, которые не смачиваются насыщенным MgO шлаком при покачивании агрегата, в свое время возникла идея принудительного ошлакования футеровки конечным шлаком [74]. Первоначально эту идею реализовывали за счет направленного разбрызгивания шлака на боковую поверхность потоком воздуха, подаваемого через трубу при горизонтальном положении конвертера. Однако, эффективность такого ошлакования была низка.

Технология раздува конечного шлака с верхней подачей нейтрального газа через кислородную фурму первоначально была разработана фирмой «Праксэйр» корпорации «Нэшил стил» (США). В исходном варианте в этой технологии в качестве технологического газа использовали аргон и лишь позднее начали использовать азот [74].

В 1991 г. на заводе фирмы «ЛТВ» (США) опробовали технологию раздувки в рамках общей программы совершенствования службы огнеупоров. Среди отмеченных достижений – рекордный срок службы футеровки, равный 15658 плавов, повышение коэффициента использования конвертера с 78% в 1984 г. до 97% в 1994 г. и снижение затрат на торкретирование на 66% при снижении удельного расхода огнеупоров на 0,38 кг/т [74, 75].

Широкое распространение этого способа в большинстве конвертерных цехов мира объясняется его простотой, низкими капитальными и эксплуатационными затратами, малыми издержками на техническое обслуживание. Для успешной реализации процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера ключевыми факторами являются параметры подачи азота, характеристики конечного шлака и оптимальное положение фурмы.

В идеальном варианте при использовании кислородной фурмы расход и давление азота должны точно соответствовать параметрам расхода и давления продувочного кислорода. На эти параметры влияют пропускная способность трубопроводов, емкость, давление и количество ресиверов для хранения газа, а также мощность компрессоров, необходимых для восстановления параметров газа в системе к следующему циклу раздува шлака [74 – 78].

Если в кислородно-конвертерных цехах с конвертерами малой емкости давление и расход азота для раздувки шлака соответствуют параметрам подаваемого на продувку ванны через верхнюю фурму кислорода, то при освоении технологии ошлакования футеровки на большегрузных конвертерах такого соответствия обеспечить не удалось [78 – 81].

Например, на 375-т конвертерах ОАО «ММК» [79] при продувке ванны расходуется 1100-1200 м³/мин кислорода, а расход азота при нанесении

шлакового гарнисажа колеблется в пределах 320-500 м³/мин. В условиях работы кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» интенсивность продувки кислородом ванны 350-т конвертеров составляет 900-1200 м³/мин, а подача азота реализуется с расходом 750-850 м³/мин [80,81].

Один из ключевых параметров процесса раздувки – это состояние шлакового расплава. Как известно, при достаточно низких значениях вязкости шлака, он легко стекает по стенкам конвертера, поэтому в большинстве конвертерных цехов пошли по пути корректировки состава конечного шлака [76, 79 –87].

Основная задача заключается в формировании в конечных твердых шлаках высокой доли высокотемпературных фаз (в том числе магнезиоферрита и магнезиовюстита), которые выполняют роль цементирующей связки между микрочастицами периклаза с сокращением до минимума (не более 5 %) концентрации низкотемпературных фаз (ферритов кальция) [49, 68].

Результаты исследования минерального состава конечных конвертерных шлаков показали, что высокоосновные конечные шлаки ($B = 5,1$) с достаточно высоким уровнем окисленности (20,1 % FeO и 8,7 % Fe₂O₃), находящиеся в области пересыщения по концентрации MgO, характеризуются, наряду с присутствием высокотемпературной силикатной фазы, достаточно высокой (15 – 20 %) концентрацией низкотемпературной ферритной фазы ($2CaO \cdot Fe_2O_3 - 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) и практически отсутствием (1 – 3 %) высокотемпературной ферритной фазы – магномагнетита (Fe, Mg) Fe₂O₄, представляющей твердый раствор магнезиоферрита и магнетита [11 – 20, 55, 56, 68, 69].

Конечные высокомагнезиальные (16 % MgO) шлаки умеренной основности ($B = 3,5$) с повышенным уровнем окисленности (24,6 % FeO и 9,2 % Fe₂O₃), наряду с высокой долей RO-фазы и высокотемпературной силикатной фазы характеризуются низким уровнем низкотемпературной ферритной фазы (6 – 10 %) и повышенной концентрацией высокотемпературной ферритной фазы – магномагнетита, равной 8 – 11 %. Шлаки такого состава позволяют формировать износоустойчивый гарнисаж [69].

Результаты минералографических исследований конечных конвертерных шлаков показали принципиальную возможность формирования высоких концентраций высокотемпературных силикатных и ферритных фаз за счет регулирования химического состава шлака, смещения его в область пересыщения MgO при умеренном уровне основности, что позволяет подобрать рациональный химический состав магнезиальных шлаков, обеспечивающих формирование износоустойчивого гарнисажа [68, 82].

Рекомендуется в начале продувки в диапазоне температур 1350 – 1400 °С и основности 2,5 – 3,0 поддерживать концентрацию MgO в шлаке на уровне 6,0 – 7,5 %; в середине продувки в диапазоне температур 1500 – 1550 °С и основности 3,0 – 3,5 – на уровне 7,0 – 8,0 %; в конце продувки в диапазоне температур 1650 – 1700 °С и основности 3,5 – 4,0 – на уровне 11 – 13 % при степени пересыщения шлака оксидом магния около 1,5 [69 – 71].

Использование различных высокомагнезиальных флюсов, по мнению авторов работ [67 – 80], способствует ускоренному формированию шлака, обогащенного оксидом магния (8-14%), с требуемыми характеристиками для обеспечения эффективного формирования шлакового гарнисажа на футеровке конвертера. Для окончательной подготовки шлака к раздуву на рабочую поверхность футеровки (снижение его реакционной способности и загущения) в конвертер дополнительно присаживают модификаторы шлака, содержащие гидрокарбонаты магния [75, 81 – 100].

В качестве основного показателя, определяющего состояние конечного шлака, используют содержание кислорода в металле на повалке перед выпуском из конвертера, которое зависит от величины окисленности шлака. При содержании кислорода в металле менее 0,004 % шлак может оказаться недостаточно жидкоподвижным для процесса раздува; содержание кислорода в пределах 0,004-0,009 % является наилучшим с точки зрения раздува шлака; при содержании кислорода выше 0,009% необходимо введение дополнительных материалов для достижения условий, оптимальных для раздува.

В производственных условиях раздув шлака продолжается не менее 2-х минут [74 – 87], но операция может быть приостановлена, если над горловиной конвертера не наблюдается характерная картина разбрызгиваемых частиц шлака.

Формирование шлакового гарнисажа на футеровке конвертера, кроме повышения стойкости последней, имеет и другие преимущества. При заливке в конвертер жидкого чугуна происходит частичное оплавление замороженного огнеупорного покрытия, что приводит к образованию некоторого количества жидкого основного шлака еще до начала продувки плавки [84 – 100].

Чтобы увеличить толщину гарнисажного покрытия на отечественных предприятиях предложили внести изменения в конструкцию футеровки. С использованием положительного опыта эксплуатации зонной и дифференцированной кладки огнеупорных изделий на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнили футеровку в виде уступов из огнеупоров разной стойкости, а на ОАО «Мечел» разработали высокопрочную огнеупорную массу для заполнения швов между кирпичами [101 – 104]. Внесенные в конструкцию футеровки изменения позволили замедлить сползание шлакового расплава с вертикальных участков футеровки. Это, в свою очередь, обеспечило увеличение массы замороженного шлака и, в целом, позволило повысить эффективность технологии нанесения шлакового гарнисажа. Таким образом, без изменения внутреннего объема агрегата удалось обеспечить продление срока службы футеровки.

Внедрение разработанных технологических вариантов раздувки подготовленного жидкого шлака на огнеупорную футеровку азотными струями, формируемыми соплами Лаваля кислородной фурмы, не обошлось без проблем как в зарубежной [74 – 78, 87], так и в отечественной [79, 84] практике.

Следует отметить, что необходимым условием высокой технологичности процесса раздувки шлака является полный выпуск стали из конвертера, в противном случае наблюдается заметалливание фурмы. Использование кислородной фурмы для нанесения шлакового гарнисажа требует частого удаления настелей со всеми последующими отрицательными явлениями (снижение стойкости наружной трубы фурмы, возрастающие трудозатраты и др.).

Кроме того, известно, что шлак практически не прилипает к холодной поверхности фурмы, особенно в случае достаточного расхода воды на ее охлаждение [74].

При нанесении шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров, работающих по технологии комбинированной продувки кислородом сверху и нейтральным газом снизу, стремятся не допускать ошлакования днища [60]. При этом расход азота на раздувку шлака должен быть достаточным, чтобы раздувать шлак с поверхности днища.

При использовании технологии раздувки шлака и повышении стойкости футеровки конвертера до 10-20 тыс. плавов необходимо для максимального увеличения производительности и эксплуатационной готовности конвертера, вывести на соответствующий уровень все его вспомогательные системы и оборудование: механический привод, систему кислородных фурм, систему улавливания и очистки конвертерного газа, оборудование для транспорта стали и шлака [74 – 76].

Значительную роль в обеспечении повышенной стойкости футеровки конвертеров сыграло также использование лазерных измерительных систем, позволяющих контролировать толщину футеровки конвертера на различных участках в процессе кампании и тем самым более эффективно осуществлять ремонт футеровки [77, 82].

Ремонт футеровки конвертеров в преобладающем количестве цехов осуществляется путем нанесения шлакового гарнисажа раздувкой подготовленного конечного шлака, подварок, а также полусухого и/или факельного торкретирования с подачей торкрет-масс на основе обожженных магнезита или доломита с использованием установок горизонтального и вертикального типов [30].

При этом необходимо отметить следующие установленные недостатки:

- добавки магнезиальных материалов с высокими потерями при прокаливании, углеродсодержащих материалов (кокса, угля) для подготовки конечного шлака к раздувке не позволяют гарантированно обеспечить

необходимые физико-химические свойства шлака из-за сильного охлаждающего эффекта присаживаемых материалов и бесконтрольного выделения газов;

- не обеспечивается в процессе раздувки шлака равномерный по толщине шлаковый гарнисаж по высоте рабочего пространства конвертера;

- раздувается на стенки конвертера только часть конечного подготовленного шлака, а остальная часть остается на днище или сливается в шлаковую чашу, что сопровождается нерациональным использованием присаживаемых магнезиальных шлакообразующих материалов;

- происходит зарастание днища конвертера, что ведет к увеличению высоты ванны и количества выбросов.

1.3 Дутьевые устройства для выполнения горячих ремонтов футеровки кислородных конвертеров. Теоретические проблемы, основные требования и подходы для разработки конструкций и их эксплуатации

Реализация технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров предполагает формирование струй азота, обладающих необходимой кинетической энергией. Последнее требует подачи нейтрального газа с расходом, соответствующим расчетному расходу кислорода для данной фурмы, что обеспечивается не всегда. Кроме этого, предусматривается изменение положения фурмы для распределения шлакового покрытия по всей поверхности футеровки или сохранение постоянного положения фурмы для покрытия шлаком определенного участка футеровки [76, 105 – 110].

Согласно [111] оптимальная высота фурмы должна превышать толщину шлака в 7 – 10 раз. Меньшее значение целесообразно поддерживать при высокой вязкости раздуваемого шлака, чтобы увеличить массу расплава, раздуваемого на верхнюю часть конвертера, и избежать зарастания днища. При жидком шлаке раздувку следует вести при повышенной исходной позиции фурмы, чтобы достичь равномерного ошлакования всех участков футеровки. В данных условиях, при повышенном расходе азота и соответствующим динамическом

воздействии при том же положении фурмы возможна раздувка и более вязкого шлака. При этом огнеупорным покрытием наиболее эффективно покрывается участок футеровки по высоте в три раза превышающий слой шлака [111].

При проектировании верхней кислородной фурмы исходят из необходимости обеспечить спокойный ход продувки металла и снизить объем брызговыноса из реакционной зоны. При раздувке шлака желательно организовать направленный брызговынос из зоны взаимодействия азотной струи с шлаковым расплавом. Таким образом число, расположение и угол наклона к вертикали сопел, расположенных в головке фурмы, может не соответствовать поставленной задаче [112 – 118].

В соответствии с разрабатываемыми положениями, при использовании специальной фурмы для раздувки шлака, достигаются следующие преимущества [112 – 118]:

- наконечник фурмы проектируется под заданный расход азота, что обеспечивает необходимое динамическое воздействие газовых струй. При этом сопла в наконечнике могут быть сгруппированы с расчетом увеличения брызговыноса на места повышенного износа футеровки конвертера (цапфенные зоны, шлаковый пояс и т.д.);
- возможность замены медного наконечника на наконечник из рядовой углеродистой стали, что снижает его стоимость и увеличивает технологичность сборки;
- фурма может быть удлинена без опасения погружения наконечника в шлаковый расплав, что позволяет повысить эффективность разбрызгивания шлака и нанесения гарнисажа при малом расходе азота;
- образующийся на стволе фурмы шлаковый гарнисаж хорошо отделяется при снижении температуры и в перерывах между операциями раздувки шлака осыпается самопроизвольно.

Опыт эксплуатации гарнисажных фурм для раздувки шлака выявил и другие направления совершенствования специальных дутьевых устройств [118 – 123]:

- разработка конструкций головок фурм с учетом большого диапазона изменения углов расположения сопел;
- разработка конструкций фурм с возможностью реализации совместного и/или последовательного нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки;
- разработка конструкций фурм для газопорошковой раздувки шлака, позволяющих наносить огнеупорное покрытие на футеровку сталеплавильного агрегата при минимальном расходе загущающих конечный шлак материалов;

Отмеченные направления совершенствования конструкций дутьевых устройств обеспечивают направленный брызговынос шлака на участки футеровки, расположенные на более высоких горизонтах, и формирование шлакового гарнисажа достаточной толщины с необходимыми прочностными и огнеупорными свойствами. «Подложкой», в данном случае, выступает конечный шлак с регламентированной концентрацией MgO , который намораживается при разбрызгивании на стенки конвертера, а в него внедряются высокоогнеупорные составляющие торкрет-массы (MgO , CaO), принимающие участие в процессе шлакообразования в последующей плавке. Сформированный слой шлакового гарнисажа наблюдается в течение последующих нескольких плавов, что свидетельствует о его высокой стойкости и низкой скорости износа [118 – 120].

Вместе с тем, подобные дутьевые устройства имеют более сложную конструкцию в сравнении с обычной кислородной фурмой, что вызывает проблемы при эксплуатации. Например: ограничения в подъеме и установке фурмы в фурменный стенд из-за большого веса; разрушение сварных швов, что приводит к возникновению течи охлаждающей воды и прекращению работы устройства; повышенные трудозатраты при изготовлении и ремонте головок фурм. Поэтому с целью дальнейшего совершенствования технологии «горячих» ремонтов футеровки были разработаны концепции фурм, охлаждение которых происходит азотом, подаваемым на раздувку шлака, а также вихревых фурм, обеспечивающих дробление и направленный брызговынос объемов шлака на локальные участки футеровки с использованием закрученной газовой струи.

Выводы и постановка задач исследования

Как показывает выполненный анализ литературных данных, в соответствии с современными представлениями, при реализации технологии процесса верхней кислородной продувки необходимо обеспечивать минимальный брызговинос металла и шлака из зоны продувки. Такая организация дутьевого режима плавки позволяет получать максимально высокие показатели процесса и сохранять в рабочем состоянии технологическое оборудование [114, 115]. Развитие технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров при раздувке конечного шлака азотными струями показывает, что в данном случае необходимо, наоборот, в максимальной степени организовать направленный брызговинос частиц шлака на стенки конвертера из пределов зон воздействия нейтральных газовых потоков на шлаковую ванну [118 – 120]. В этой связи, необходимо исследовать и разрабатывать новые технологические подходы, позволяющие максимально дробить шлаковый расплав и наносить его на поверхность футеровки [120 – 122]. Важно количественно оценить режимы взаимодействия азотных струй различной структуры со шлаком при раздувке и формировании отраженных от жидкой ванны обратных газо-жидкостных потоков, выносящих в направлении футеровки брызги и частицы шлака. Некоторые исследования гидрогазодинамических закономерностей взаимодействия газовых струй с жидкостью уже известны [105 – 113]. В то же время существование возможных режимов взаимодействия более сложных турбулизированных струй со шлаковой ванной не принимается во внимание даже в последних работах по моделированию процесса нанесения шлакового гарнисажа путем раздувки конечного шлака [120 – 124]. Вместе с тем, такая информация о структуре и размерах зон взаимодействия вихревых азотных струй с шлаковым расплавом при различных дутьевых режимах, характеристиках обратных потоков (скорость, размеры капель, траектория движения и т.д.) крайне важна для разработки новых подходов и конструкций специальных фурм.

Поскольку технология нанесения шлакового гарнисажа представляет собой компромиссный вариант сохранения жидкоподвижного шлака в конвертере по ходу продувки с образованием по окончании операции при затвердевании и кристаллизации шлака износоустойчивого гарнисажа на поверхности футеровки, то особо важным моментом процесса является охлаждение капель и брызг шлака ниже точки плавления непосредственно при соприкосновении с футеровкой с одновременным приобретением необходимых огнеупорных свойств формируемого гарнисажа.

В этой связи представляет несомненный теоретический и практический интерес технология раздувки шлакового расплава нейтральными газовыми струями, несущими во взвешенном состоянии порошкообразные магнезиальные шлакообразующие материалы. Такая технология должна обеспечивать формирование шлаковых капель с необходимыми физико-химическими свойствами непосредственно в зонах воздействия газопорошковых струй на шлаковый расплав и последующее намораживание такого гарнисажа на стенки конвертера. В данных условиях дополнительное использование высокомагнезиальных флюсов должно только улучшить показатели процесса. Поэтому исследование процесса шлакообразования в характерные периоды продувки позволит значительно обогатить знания о механизме растворения флюсов и формировании огнеупорного покрытия.

Чрезвычайно важными представляются дальнейшие исследования по разработке и обеспечению работоспособности и высокой стойкости дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегатов. В данных условиях упрощение конструкции и научное обоснование режима газового охлаждения специальных фурм, выполненное на основании анализа процессов теплообмена в рабочем пространстве агрегата, позволит оптимизировать показатели технологии и снизить себестоимость производства стали.

Предложенные ресурсосберегающие технологические варианты повышения эффективности «горячих» ремонтов футеровки агрегатов при нанесении

огнеупорных покрытий являются новыми, поэтому реализация последних в производственных условиях предусматривает получение отсутствующей на сегодняшний день информации относительно:

- гидродинамических и массообменных процессов в рабочем пространстве агрегата при раздувке шлака вихревыми газовыми струями, истекающими из сопел при различных расходах газа;
- управляющих воздействий при нанесении огнеупорных покрытий на футеровку при использовании вихревых течений с определением размеров частиц, скорости движения потоков и состояния шлакового расплава;
- физико-химических и минералогических свойств конвертерных, в том числе гарнисажных шлаков, при использовании высокомагнезиальных флюсов в конвертерной операции.

На основании изложенного в настоящей диссертационной работе поставлены следующие задачи:

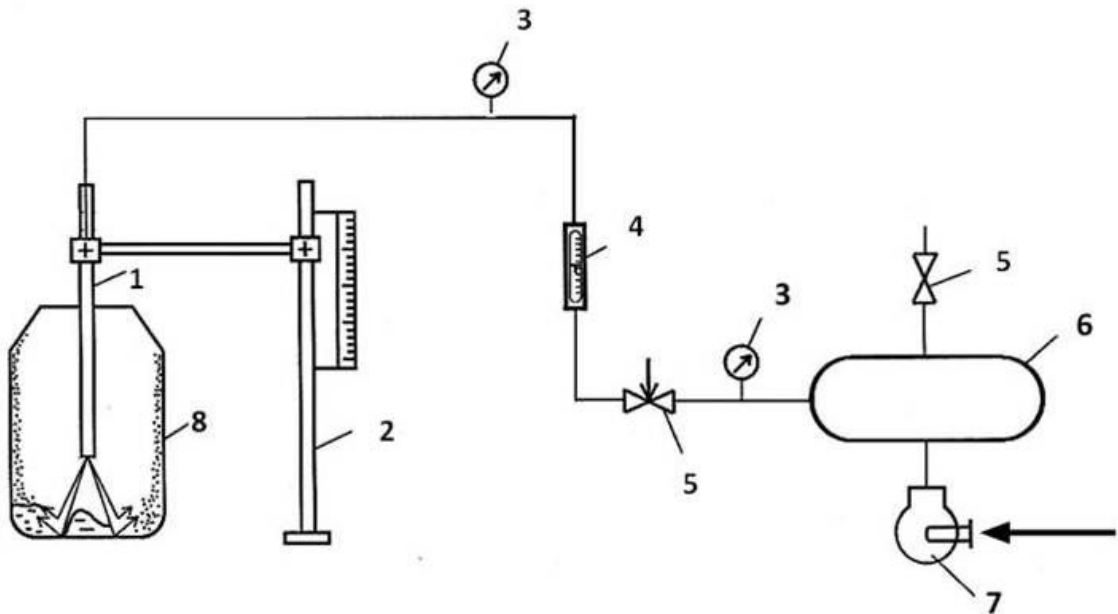
- выполнить экспериментальные и аналитические исследования нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородного конвертера вихревыми газовыми струями;
- исследовать характеристики теплообмена и научно обосновать газовое охлаждение специальных дутьевых устройств для раздувки шлакового расплава в 350-т агрегатах АО «ЕВРАЗ ЗСМК»;
- исследовать особенности процессов шлакообразования, рафинирования металла и растворения огнеупоров для совершенствования технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов.

2 Изучение особенностей применения вихревых течений для оптимизации процесса нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегатов

2.1 Методика низкотемпературного моделирования процесса формирования огнеупорных покрытий на футеровке

Как известно, механизм взаимодействия газовых струй со шлаковым расплавом с высокой степенью достоверности можно изучать с использованием методов физического моделирования [116, 117]. В процессе исследований особенности гидродинамики шлаковой ванны изучали методами низкотемпературного моделирования с использованием усовершенствованной установки [124] на основе прозрачной плексигласовой модели конвертера (рисунок 2.1), профиль и размеры рабочего пространства которой выполнены в масштабе 1:20 по отношению к 350-т агрегатам АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»). Такая установка и усовершенствованная методика исследований позволяют изучать особенности раздувки крахмального клейстера, моделирующего шлаковый расплав, воздушными или воздушно-порошковыми газовыми струями различной структуры при фиксировании процесса цифровой видеокамерой в различных ракурсах.

Подачу газовых струй различной структуры осуществляли через разработанные конструкции наконечников для верхней фурмы (рисунок 2.2 а-в), в том числе со специальным устройством, обеспечивающим получение вихревой газовой струи (г). Варианты конструкции наконечников (рисунок 2.2, а-в) предназначены для продувки шлаковой ванны газовыми стационарными струями с обеспечением направленного брызговыноса капель моделирующей жидкости на стенки модели конвертера. При проведении эксперимента струи формировались с помощью сменных наконечников, имеющих два, три или четыре цилиндрических сопла диаметром 3 мм, расположенных под углом 20° к вертикальной оси фурмы.



1- фурма; 2 -устройство крепления и перемещения фурмы; 3 - манометры; 4 - ротаметр; 5 - вентили; 6 - ресивер; 7- компрессор; 8 – модель конвертера

Рисунок 2.1 – Схема установки физического моделирования процесса нанесения шлакового гарнисажа

При выполнении конкретного эксперимента выбор головки с необходимым количеством сопел определяли на основании анализа результатов моделирования с условием обеспечения равномерного нанесения шлакового гарнисажа по всей высоте рабочего пространства модели конвертера.

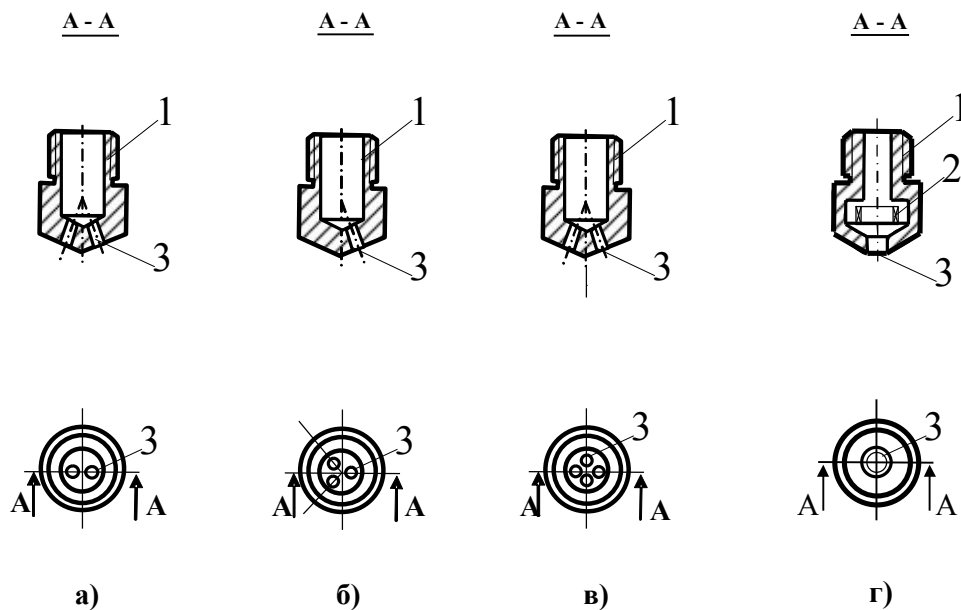
Для раздувки конечного шлака специальными гарнисажными фурмами в промышленных условиях определяющими параметрами дутьевого режима являются:

– число сопел Лавалья в наконечнике фурмы $n_{\text{л}}$, шт; угол наклона сопел к вертикальной оси фурмы α и в плане между осями соседних сопел γ_1 , град; выходной диаметр сопла $d_{\text{с}}^{\text{л}}$, м; диаметр окружности расположения осей выходных сечений сопел на торце наконечника $d_{\text{о}}^{\text{л}}$, м;

– объемная скорость азота через одно сопло $q_{\text{г}}^{\text{л}}$, м³/с; линейная скорость $U_{\text{вых}}^{\text{л}}$, м/с, плотность $\rho_{\text{г}}$, кг/м³, и температура азотной струи на выходе из сопла

$T_{\text{вых}}^{\Gamma}$, К; расстояние от среза сопла до дна конвертера, $H_{\text{ф}}$, м; температура окружающей среды в полости конвертера $T_{\text{окр}}$, К;

– глубина жидкой ванны шлака $h_{\text{ш}}$, м; диаметр цилиндрической части конвертера $D_{\text{ц}}$, м; плотность жидкого шлака $\rho_{\text{ш}}$, кг/м³; глубина $L_{\text{к}}$ и диаметр $D_{\text{к}}$ обособленной зоны взаимодействия в шлаковой ванне, м; общий диаметр зоны на поверхности шлака $D_{\text{общ}}$, м; скорость отраженного потока азота, перемещающегося вдоль поверхности зоны $U_{\text{отр}}$, м/с; ускорение свободного падения g , м/с².



1 – наконечник фурмы; 2 – вихревой аппарат; 3 – сопло

Рисунок 2.2 – Конструкции наконечников для раздувки шлака стационарными (а-в) и вихревыми струями (г)

Следует отметить, что распространение азотных струй в рабочем пространстве конвертера происходит в неизотермических условиях.

В случае раздувки шлака азотно-порошковыми струями через специальную гарнисажную фурму, содержащую головку с соплами Лаваля для подачи азота и порошкообразных магнезиальных материалов в потоке несущего газа (азот, воздух), наряду с вышеперечисленными, дополнительными параметрами будут:

– число цилиндрических сопел в наконечнике фурмы $n_{\text{ц}}$, шт; диаметр цилиндрического сопла $d_{\text{с}}^{\text{ц}}$, м; угол в плане между осями соседних цилиндрических сопел γ_2 , град; угол наклона цилиндрических сопел к горизонтальной оси фурмы β , град;

– расход порошкообразного материала через цилиндрическое сопло $m_{\text{с}}^{\text{ц}}$ (кг/с) и объемная скорость несущего газа $q_{\text{с}}^{\text{ц}}$ (м³/с).

Не вызывает сомнений, что при заданной интенсивности подачи азота через обычную многосопловую фурму приближение последней к шлаковой ванне ведет к увеличению удельного давления струи и скорости отраженного потока азота, а также интенсивности брызговыноса капель шлака.

Известно, что импульс потока струи ($i_{\text{Г}}$) в точке встречи с поверхностью ванны определяет объем жидкости, вытесняемой в зоне взаимодействия, а удельное давление потока ($T = i_{\text{Г}} / F_{\text{ж}}$, Па) – глубину внедрения струи и разбрызгивание жидкой ванны [125]. В случае физического моделирования динамическое подобие в дутьевом режиме модели и образца можно обеспечить, как и в работах [119, 124, 126], путем соблюдения равенства соотношений:

$$i_{\text{Г}} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{n}{m_{\text{ж}} \cdot g} = \text{idem}; \quad (2.1)$$

$$\frac{H_{\text{ф}}}{d_{\text{с}}} = \text{idem}; \quad \frac{d_{\text{о}}}{D_{\text{ц}}} = \text{idem}, \quad (2.2)$$

где $i_{\text{Г}}$ – импульс газовой струи, кг·м/с²; α – угол наклона сопел к вертикальной оси фурмы, град; n – количество сопел в наконечнике, шт.; $m_{\text{ж}} = K_{\text{к}} \rho_{\text{ж}} F_{\text{ж}} h_{\text{ж}}$ – масса жидкого шлака, кг ($K_{\text{к}}$ – коэффициент, учитывающий форму днища конвертера; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность шлакового расплава, кг/м³; $F_{\text{ж}}$ – площадь поверхности шлаковой ванны, м²; $h_{\text{ж}}$ – глубина жидкой ванны в спокойном состоянии, м); $H_{\text{ф}}$ – высота нахождения фурмы, м; $d_{\text{с}}$ – диаметр сопла, м; $d_{\text{о}}$ – диаметр окружности расположения осей выходных сечений сопел на торце наконечника, м; $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндрической части конвертера, м.

Соблюдение равенства соотношений (2.1), (2.2) предполагает использование определяющих параметров дутьевого режима ошлакования футеровки.

Принимая во внимание соотношение (2.1), можно записать

$$\frac{i_{\Gamma} \cdot \cos \alpha \cdot n}{m_{\text{ж}} \cdot g} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma}^2 \cdot \cos \alpha \cdot n}{m_{\text{ж}} \cdot g \cdot F_{\text{кр}}} = \frac{\rho'_{\Gamma} \cdot (Q'_{\Gamma})^2 \cdot \cos \alpha \cdot n}{m'_{\text{ж}} \cdot g \cdot F'_{\text{кр}}} = \kappa_{\text{д}} = \text{idem}, \quad (2.3)$$

где $F_{\text{кр}}$ – площадь критического сечения сопла Лаваля, м^2 ; ' - штрих относится к модели.

Тогда, расход газа на одно сопло наконечника фурмы для модели (Q'_{Γ} , $\text{м}^3/\text{с}$) определяется из выражения

$$Q'_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma}^2 \cdot m'_{\text{ж}} \cdot F'_{\text{кр}}}{m_{\text{ж}} \cdot \rho'_{\Gamma} \cdot F_{\text{кр}}}}. \quad (2.4)$$

2.2 Исследование аэрогидродинамики шлаковой ванны при использовании вихревых течений для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку

Известно, что эффективная реализация технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров предусматривает возможность использования специальных дутьевых устройств и определенного дутьевого режима операции [127 – 129].

Ранее установлено, что при обычном варианте раздувки моделирующей жидкости газовыми струями [124, 130] наблюдается два основных гидрогазодинамических режима взаимодействия (рисунок 2.3) при глубине ванны, соответствующей количеству оставляемого конечного шлака (примерно 10-12% от массы жидкой стали).

При первом режиме взаимодействия раздувка шлака реализуется при внедрении газовых струй на глубину, не превышающую глубину шлаковой ванны, при втором режиме происходит пробой газовыми струями слоя шлакового расплава. Второй режим взаимодействия многоструйного газового дутья со

шлаковой ванной является основным в практике гарантированного нанесения шлакового гарнисажа по всей высоте футеровки.

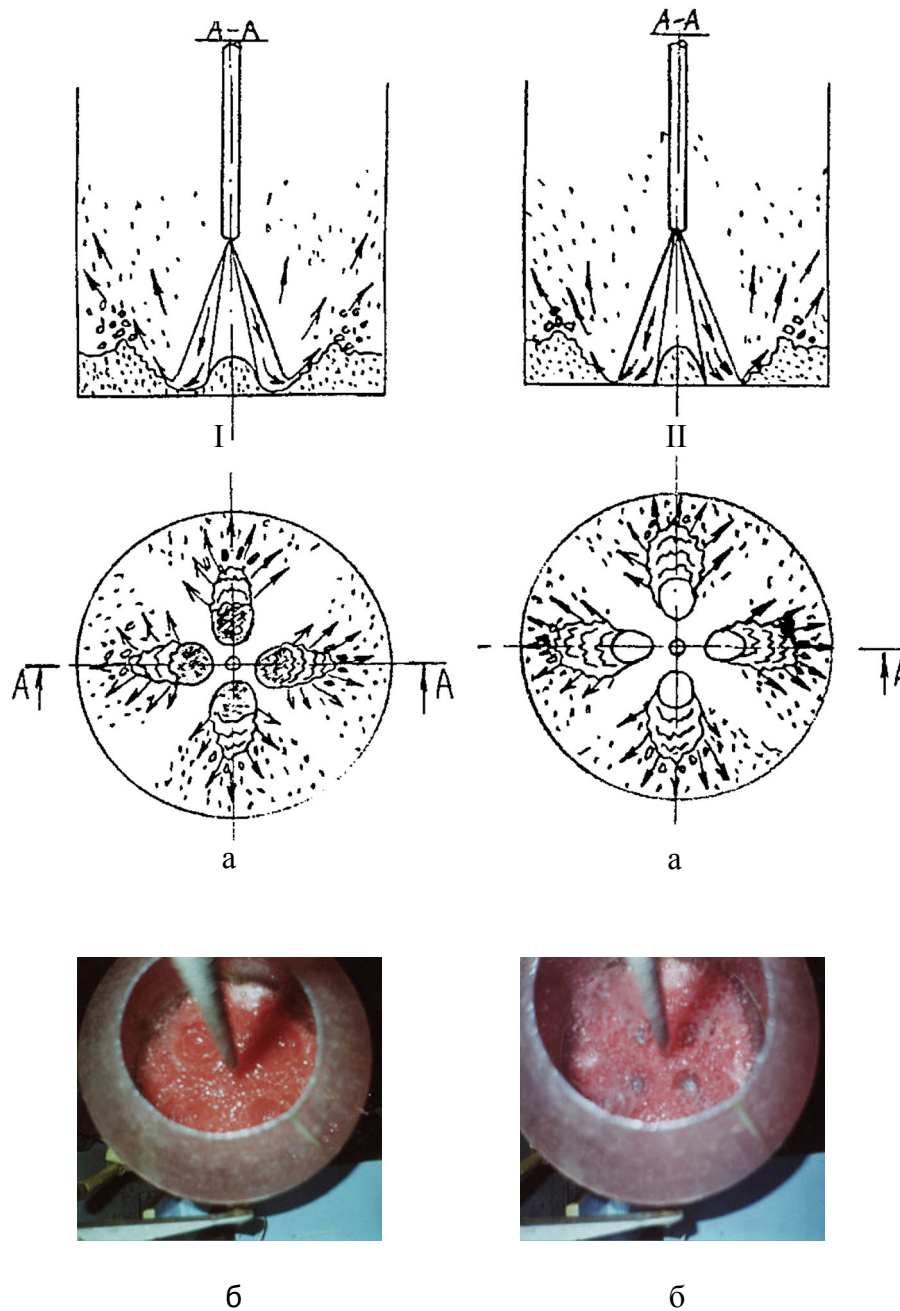


Рисунок 2.3 – Схемы (а) и фотографии (б) режима I (I) и режима II (II) взаимодействия воздушных струй с крахмальным клейстером при использовании четырехсоплового наконечника

При реализации первого режима взаимодействия, под действием отраженного потока газа, у границ каждого кратера формируются гребни волн, которые перемещаются по поверхности кратера в радиальном направлении. При этом на периферии образуется своеобразный вал (возвышение) над уровнем жидкости, с вершины которого отрываются, прежде всего, крупные всплески и брызги жидкости с преимущественным направленным выносом более мелких капель по траектории отраженного потока.

По мере увеличения диаметра кратера эллипсовидной формы по большой оси и при приближении внешней границы вала к поверхности футеровки конвертера (что происходит в случае увеличения расхода газа, высоты фурмы или угла наклона сопел фурмы к вертикальной оси фурмы), крупные всплески и брызги жидкости все в большем количестве выносятся на стенки конвертера, создавая своеобразный пленочный слой. При этом траектория направленного выноса мелких капель изменяется в сторону снижения уровня (высоты) попадания капель на футеровку, то есть возможной высоты нанесения защитного огнеупорного покрытия.

Необходимо отметить, что в этом случае образующиеся кратеры, как правило, стабилизированы относительно вертикальной оси фурмы. Разрушение всплесков с направленным выносом брызг на стенки конвертера обусловлено, прежде всего, подрезанием гребня волны на краю вала отраженным от основания кратера газовым потоком. Очевидно, что значительно меньший объем брызговыноса при таком режиме связан с разрушением гребня волн по поверхности кратера. При этом зона максимального брызговыноса из каждого обособленного кратера (при визуализации в плане (рисунок 2.3, I а) сосредоточена на стороне воздействия отраженного потока газа на жидкость, то есть в ближнем к стенкам конвертера полуобъеме кратера эллипсовидной формы.

Второй режим взаимодействия многоструйного дутья с жидкой ванной малой высоты (рисунок 2.3, II б), характеризуется картиной, когда в рассматриваемом диапазоне изменения величин расхода газа, высоты фурмы или угла наклона сопел фурмы к вертикальной оси фурмы происходит пробой

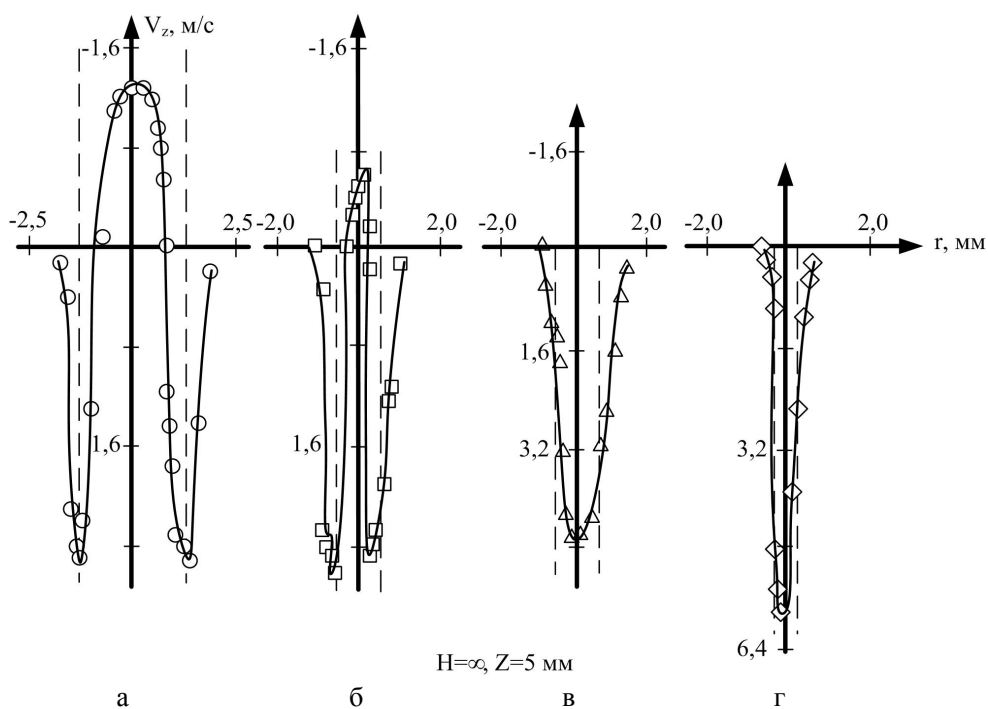
газовыми струями столба жидкости с образованием мощного отраженного от днища обратного газожидкостного потока. При этом формируются обособленные или соприкасающиеся кратеры эллипсовидной формы, что является определяющим и основным фактором в обеспечении эффективности раздувки расплава с целью нанесения гарнисажа на футеровку конвертера. В данном случае диаметр основания обособленного кратера на зеркале ванны (рисунок 2.3, II б) практически совпадает с диаметром вдуваемой наклонной струи на этом уровне, а обратный газовый поток вызывает перемещение жидкости по поверхности кратера с развитием брызговыноса, возникновением и разрушением крупных всплесков, особенно на возвышающейся периферийной части кратера. На периферии кратера (в случае приближения последнего к футеровке) наблюдается разрушение гребня как катящейся по поверхности волны, так и отраженной от стенки агрегата обратной волны, распространяющейся по поверхности ванны.

При оптимальных значениях H_{ϕ} и $h_{ж}$ формируются вытянутые в направлении большей оси кратеры эллипсовидной формы с периодически «захлопывающимися» жидкостью периферийными участками (рисунок 2.3, II а,б).

В результате создающегося препятствия на пути движения отраженного от днища газожидкостного потока со стороны объемов расплава, образующих своеобразную жидкую оболочку («крышу») над периферийной областью кратера, после эффекта «захлопывания» последней происходит разрушение оболочки с взрывным характером брызговыноса шлака на футеровку конвертера по всей высоте рабочего пространства. Снижение высоты фурмы ниже оптимальных значений при фиксированном расходе дутья ведет к уменьшению диаметра кратера по большой оси, форма кратера на поверхности ванны приближается к окружности, происходит снижение интенсивности направленного на футеровку агрегата брызговыноса и увеличение его по стволу фурмы и вертикальной оси конвертера за пределы рабочего пространства. Чрезмерный подъем фурмы над ванной приводит к приближению внешних границ кратеров к футеровке, что сопровождается омытием волнами и крупными всплесками жидкости футеровки и уменьшением высоты брызговыноса.

В отличие от стационарной, вихревая газовая струя характеризуется дополнительно радиальной и, соответственно, тангенциальной составляющими скорости, что обеспечивает характерное истечение газового потока из выходного сопла [131, 132].

Для определения аэродинамических особенностей поведения вихревой газовой струи были исследованы поля скоростей на выходе из сопла фурмы. Исследования выполнены с использованием лазерного доплеровского измерителя скорости, при этом диаметр выходного сопла варьировали в пределах от 0,5 до 2,5 мм. Распределение осевой компоненты скорости на выходе из сопла вихревой фурмы представлено на рисунке 2.4. Фактические измерения выполнены на расстоянии 5 мм от среза сопла (на рисунке 2.4 штриховой линией показаны геометрические границы выходного сечения сопла).



а – $Q_p = 29,0$ г/ч, $d = 2,5$ мм; б – $Q_p = 9,1$ г/ч, $d = 1,0$ мм; в – $Q_p = 18,8$ г/ч, $d = 1,0$ мм; г – $Q_p = 9,1$ г/ч, $d = 0,5$ мм [132]

Рисунок 2.4 – Распределение осевой компоненты скорости вихревой струи при различных диаметрах (d) выходного сопла и различных расходах (Q_p) воздуха

Как видно, профиль осевой компоненты скорости зависит от диаметра выходного сечения сопла и расхода воздуха. При диаметре 0,5 мм профиль скорости напоминает профиль обычной струи, а при диаметре сопла 1,0 мм появляющееся возвратное течение возникает только при определенном расходе газа, при диаметре 2,5 мм фиксируется зона интенсивного возвратного потока.

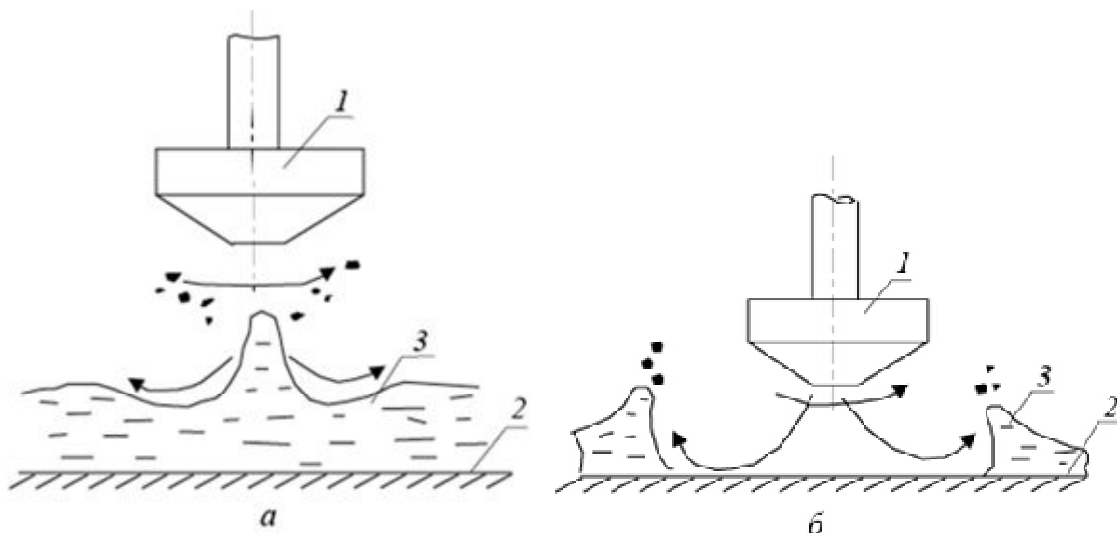
В сечении струи профиль тангенциальной скорости сохраняется при закручивании газового потока, а основной характеристикой является положение максимума скорости. При интенсивном закручивании потока максимум скорости смещается к пограничному слою, а при незначительном – максимум приближается к оси распространения газовой струи. Интенсивно закрученный поток, приближается к профилю коаксиальной струи, а слабо закрученный поток приближается к профилю обычной струи. Следует предполагать, что смещение вектора тангенциальной скорости при распространении газовой струи обусловлено трением с окружающей средой при более турбулентном течении потока.

В зависимости от высоты расположения фурмы в случае создания интенсивно закрученного потока можно также реализовать два характерных вида взаимодействия вихревой струи и жидкости: вариант 1 – над поверхностью расплава создается вихрь, который втягивает жидкость и отбрасывает его в сторону стенок конвертера (рисунок 2.5, а); вариант 2 – струя в условиях «пробоя» оттесняет расплав на периферию, и дробление происходит на некотором удалении от фурмы (рисунок 2.5, б).

Размер капель при этом, очевидно, определяется двумя основными параметрами – затратами энергии на образование новой поверхности и преодоление сил вязкого трения при деформации капли. Часть энергии струи при этом затрачивается на разгон образующихся частиц, а значительная часть сохраняется в виде кинетической энергии вихревого газового потока.

В случае реализации взаимодействия по варианту 1 (рисунок 2.5, а) к центральной части ванны поступает расплав, который затягивается в вихрь и распыляется по внутреннему объему конвертера, при этом основной процесс

реализуется в центре вихря. При реализации варианта 2 (рисунок 2.5, б) по окружности возникает своеобразная кольцевая зона двухфазного потока, имеющего меньшую плотность, который в виде пены выносится потоком газа на стенки агрегата [133, 134]. Физически механизм дробления расплава на капли в обоих случаях аналогичен и описывается подобными соотношениями, но в количественном отношении разница может быть существенной.



1 – фурма с вихревой камерой; 2 – футеровка дна конвертера; 3 – жидкость; а – режим взаимодействия с зоной пониженного давления; б – режим взаимодействия с отеснением расплава от дна

Рисунок 2.5 – Раздувка расплава вихревой струей [135]

При использовании положений теории подобия возможно определить режим течения, и, соответственно, спрогнозировать количество и размер образующихся частиц [136 – 142]. При исследовании режимов взаимодействия вихревого газового потока с жидкостью (рисунок 2.5, а) установлено, что положение зоны подъема расплава газовым вихрем определяется выходным сечением сопла фурмы. Согласно экспериментальным данным [137, 138] уровень турбулентных пульсаций вихревой газовой струи на выходе из сопла может достигать очень больших величин.

Предположим, что при распылении капиллярные и вязкие силы имеют один порядок величины, а в области взаимодействия при распылении энергия восполняется за счет притока газа [142]. Поток кинетической энергии газа $\rho_r \Delta u^2 u S_\phi \tau^{2/3}$ (где ρ_r – плотность газа, кг/м³; u – окружная скорость потока, м/с; Δu – разность скоростей частицы и пульсаций газовой среды, м/с; S_ϕ – площадь сечения газовой струи по эффективному диаметру вихря (максимуму тангенциальной скорости), м²; $\tau = Q_{ж}/Q_r$ – отношение объемных расходов жидкой фазы и газа) расходуется на преодоление сил вязкого трения при деформации капли $\pi \mu_r \Delta u n_\phi D^2$ (где μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с; n_ϕ – число частиц, поступающих в область дробления в единицу времени; D – размер частиц, м) и образование дополнительной поверхности раздела фаз $\pi \sigma n_\phi D^2$ (где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м). Приравняв выражения, получим

$$\rho_r \Delta u^2 u S_\phi \tau^{\frac{2}{3}} \approx \pi \mu_r \Delta u n_\phi D^2 + \pi \sigma n_\phi D^2 \quad (2.5)$$

где $\rho_r \Delta u^2$ – аналог кинетической энергии пульсаций газовой среды, кг/м·с².

Число частиц определяется по выражению

$$n_\phi = 6 \frac{G_{ж}}{\pi \rho_{ж} D^3}; \quad \frac{G_{ж}}{\rho_{ж}} = Q_{ж}; \quad Q_r = u S_\phi, \quad (2.6)$$

где $G_{ж}$ – массовый расход частиц, кг/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Тогда диаметр капель можно оценить по выражению

$$D \approx 6 \frac{\tau^{\frac{1}{3}}}{\rho_r U_r^2} \cdot (\sigma + \mu_r U_r). \quad (2.7)$$

Если левую и правую части полученного соотношения разделить на эффективный диаметр поднятого столба жидкости, то получается следующее критериальное уравнение:

$$\frac{D}{d} = 6 \tau^{\frac{1}{3}} \left(We^{-1} + Re^{-1} \frac{\mu}{\mu_r} \right) \quad (2.8)$$

где $We = \rho_r U_r^2 \frac{d}{\sigma}$ – число Вебера; $Re = \frac{\rho U_r d}{\mu_r}$ – число Рейнольдса; d – эффективный диаметр столба жидкости; ρ_r – плотность газа; ρ – плотность жидкости; U_r – скорость газового потока; τ – отношение объемных расходов жидкой фазы и газа; μ_r – коэффициент динамической вязкости газа; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

На диаметр частиц, отрывающихся от расплава, накладывается следующее ограничение: в данном месте образуется двухфазный поток частиц шлака и газа, который выходит из воронки со скоростью, не превышающей скорости звука.

2.3 Исследование особенностей дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой

Как известно [137 – 140], формы совместного движения газа и жидкости (в том числе в металлургических системах) исключительно многообразны: от двух сплошных параллельных потоков, взаимодействующих по одной непрерывной границе раздела, до пены, в которой обе фазы образуют сложную и неустойчивую структуру.

На поверхности раздела фаз возникают силовые, тепловые и массообменные взаимодействия, которые оказывают влияние на поля скоростей, давлений, температур и концентраций в различных фазах, отделенных друг от друга поверхностью раздела. На границе раздела фаз возникают скачки давления, температуры, концентрации и скорости течения.

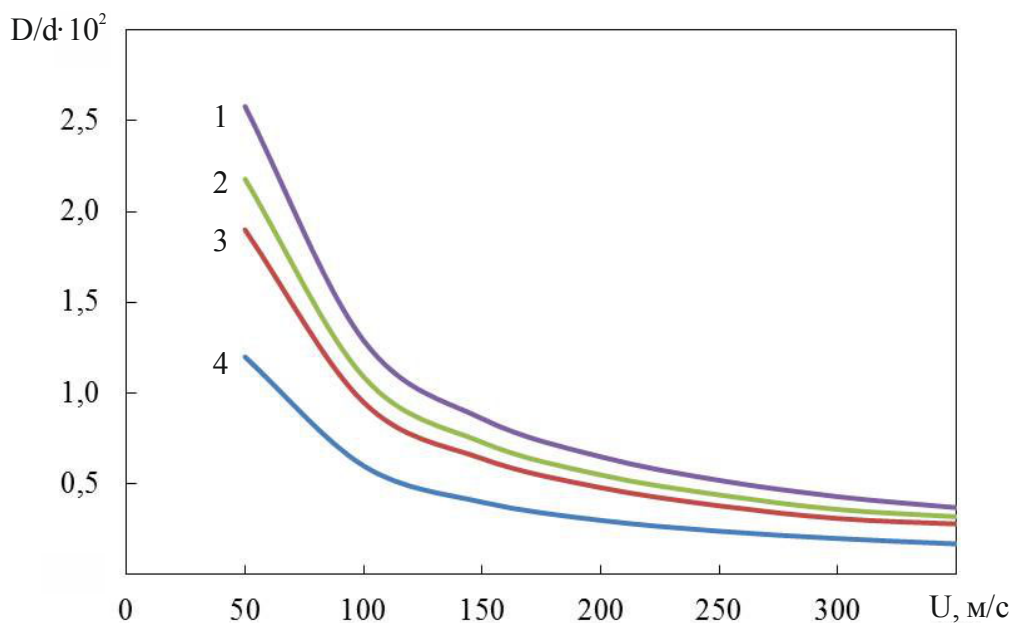
При выполнении расчетов были использованы следующие значения физико-химических свойств жидкого шлака [140]: $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³; $\mu = 0,1 - 0,3$ Па·с. при $T = 1450$ °С; $\nu = (0,3 - 1) \cdot 10^{-4}$ м²/с; $\sigma = 0,5 - 0,6$ Н/м при $1400 - 1600$ °С. В качестве несущего газа при дроблении и разбрызгивании шлака применяется азот, для которого характерно $\rho_N = 1,25$ кг/м³, $\mu_N = 2,1 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Результаты предварительных расчетов при скорости газожидкостного потока 100 м/с

показали, что эффект, связанный с действием поверхностного натяжения, в сравнении с действием, оказываемым трением, составляет не более 2 %, и с увеличением скорости его действие уменьшается. В связи с этим в дальнейших расчетах учитывали только действие вязкостного трения.

Использование высокомагнезиальных флюсов по ходу продувки увеличивает вязкость шлака, поэтому второй член в выражении (2.8) намного больше первого, таким образом выражение (2.8) значительно упрощается:

$$\frac{D}{d} = 6\tau^{\frac{1}{3}} \left(\text{Re}^{-1} \frac{\mu}{\mu_r} \right) \quad (2.9)$$

На рисунке 2.6 приведены результаты расчета по уравнению (2.9) относительного диаметра капель жидкости при изменении относительного объемного расхода жидкой фазы τ в диапазоне $10^{-3} - 10^{-2}$.



1 – $\tau=10^{-2}$; 2 – $\tau=6 \cdot 10^{-3}$; 3 – $\tau=4 \cdot 10^{-3}$; 4 – $\tau=10^{-3}$

Рисунок 2.6 – Зависимость D/d от скорости потока газа и отношения объемных расходов жидкой фазы и газа [143]

Очевидно, что размер образующихся капель определяется не только скоростью газового потока, но и расходом газа. Предварительный расчет размера

шлаковых частиц проводили при значении $\tau \sim 10^{-3}$, что соответствует соотношению $G_{\text{ж}}/G_{\text{г}} = 2,4$ (где $G_{\text{ж}}$ – массовый расход жидких шлаковых частиц, кг/с, $G_{\text{г}}$ – массовый расход газа, кг/с) [144].

Описание физического механизма диспергирования как в центральной зоне, так и на границе взаимодействия газового потока, шлакового расплава и огнеупорной футеровки конвертера при раздувке шлака в режиме «пробой» аналогично. Это позволяет оценить размер капель следующим образом [139]: в соотношении (2.9) за масштаб можно принять диаметр зоны взаимодействия ($d_{\text{вз}}$), из которой струя газа вытеснила жидкий шлак, что предопределяет использование поправочного коэффициента k , причем $k = D/d_{\text{вз}}$. Тангенциальная скорость снижается, исходя из распределения $1/r$ (где $r = d/2$) [141], которое также является отношением диаметров, то есть поправка будет определяться как $(D/d_{\text{вз}})^2$. Пульсационная составляющая взаимодействия также снижается по такой же зависимости, поэтому при раздувке шлакового расплава по периферии вероятно увеличение диаметра частиц шлака.

Размер частиц, образующихся на границе шлакового расплава, ограничен. Это связано с образованием в данной области двухфазного потока частиц шлака и газа, который способствует вспениванию газошлаковой эмульсии, в связи с чем частицы шлака выносятся из зоны взаимодействия со скоростью, не превышающей скорость распространения звука в смеси. Скорость звука для смеси азота и жидкого шлака ($a_{\text{см}}$) определяли из выражения [142]:

$$1/a_{\text{см}}^2 = \partial \rho_{\text{см}} / \partial P = \rho_{\text{см}} \left[\phi / (\rho_{\text{г}} a_{\text{г}}^2) + (1 - \phi) / (\rho_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2) \right]; \quad (2.10)$$

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{ш}} (1 - \phi) + \rho_{\text{г}} \phi; \quad (2.11)$$

здесь $a_{\text{г}}^2 = \partial \rho_{\text{г}} / \partial P$ – скорость звука в среде азота; $a_{\text{ш}}^2 = \partial \rho_{\text{ш}} / \partial P$ – скорость звука в среде шлака; $\rho_{\text{г}}$ и $\rho_{\text{ш}}$ – плотность азота и шлака; P – давление среды; ϕ – газосодержание потока.

Результаты расчета скорости звука для газошлаковой эмульсии представлены на рисунке 2.7. Практически во всем диапазоне скорость звука не

превышает 30 м/с и только в крайних случаях, при незначительном газосодержании или при практически полном отсутствии шлака в эмульсии, скорость распространения звука увеличивается: при $\phi = 0,01$ до 69,8 м/с, при $\phi = 0,99$ до 68,0 м/с [143].

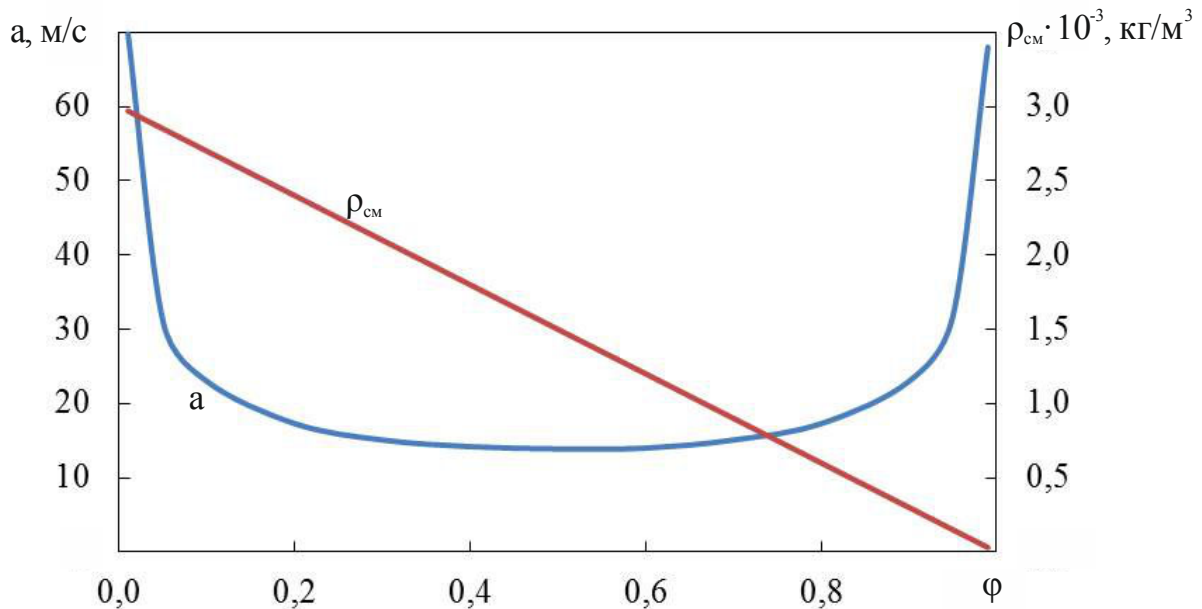


Рисунок 2.7 – Зависимость скорости звука в газшлаковой эмульсии и плотности смеси от газосодержания [144]

Как установлено в работе [138], при выходе газового потока из сопла фурмы над поверхностью шлака образуется вихревой поток, который имеет область пониженного давления в центре. Если предположить, что тангенциальная скорость убывает при удалении от центра вихря как $1/r$, то давление над поверхностью определяется уравнением [134]:

$$1/\rho_r dP/dr = \Gamma^2/r^3, \quad (2.12)$$

где Γ – циркуляция скорости.

Решением этого уравнения является выражение

$$P = P_0 - \rho \Gamma^2/r^2, \quad (2.13)$$

где P_0 – атмосферное давление.

При истечении вихревого газового потока из сопла фурмы давление газа значительно меньше, чем в окружающей среде. Таким же будет давление и над поверхностью шлаковой ванны. В результате за счет перепада давления шлаковый расплав в зоне взаимодействия перемещается от периферии к центру. Необходимо отметить, что только при определенной высоте фурмы относительно поверхности шлака реализуется течение шлака по описанной траектории. Движение шлака под действием перепада давления над поверхностью определяется уравнением

$$VdV/dr = -1/\rho_{\text{ш}}dP/dr, \quad (2.14)$$

где V – скорость движения шлака.

При подстановке значения давления из соотношения (2.13), получается

$$V^2/2 = \rho_r/\rho_{\text{ш}}\Gamma^2/(2r^2). \quad (2.15)$$

Откуда следует, что

$$V = 2\Gamma/d(\rho_r/\rho_{\text{ш}})^{1/2}. \quad (2.16)$$

Тогда объемный расход шлака, поступающего в зону взаимодействия, можно оценить следующим соотношением:

$$Q = \pi\xi^2 d_0 \Gamma (\rho_r/\rho_{\text{ш}})^{1/2}/2, \quad (2.17)$$

где ξ – параметр, характеризующий положение границы вихря, где давление меньше атмосферного.

Положение границы вихря определяется параметрами фурмы ($\xi \sim 0,5 - 0,6$). В этих условиях скорость движения шлака на уровне среза фурмы составляет примерно 4 м/с, а расход разбрызгиваемого шлака – 0,016 м³/с (или 57 м³/ч).

2.4 Исследование параметров движения капель шлака в рабочем пространстве конвертера

Известно, что мелкие капли шлака быстро достигают скорости потока транспортирующего газа, двигаются вместе с ним и частично восходящими потоками выносятся из конвертера в газоотводящий тракт [145 – 148]. Более крупные капли также разгоняются потоком газа и в дальнейшем двигаются как по инерции, так и под влиянием аэродинамики потока. При получении импульса наиболее крупные капли двигаются по инерции, достигая футеровки конвертера, испытывая при этом только сопротивление среды. Так как для условий раздувки шлака в кислородном конвертере характерно турбулентное течение газов, то математическое описание параметров обтекания капель шлака газом выполняли в соответствии с законом Ньютона.

Для анализа рассматривали движение капли шлака по траектории из зоны диспергирования к футеровке для условий рабочего пространства конвертера. Поток транспортирующего газа, несущий капли шлака, движется преимущественно вверх по спирали. Тогда траекторию движения капель можно описать системой уравнений [131]:

$$dW_{\varphi}/dt = W_r W_{\varphi}/r - (W_{\varphi} - V_{\varphi}) V_s/L; \quad (2.18)$$

$$dW_r/dt = W_{\varphi}^2/r - (W_r - V_r) V_s/L; \quad (2.19)$$

$$dW_z/dt = -(W_z - V_z) V_s/L, \quad (2.20)$$

где W_{φ} , W_r , W_z и V_{φ} , V_r , V_z – тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости капли шлака и газового потока, соответственно; V_s – относительная скорость обтекания капли шлака потоком газа; L – характерное

расстояние, на котором капля шлака разгоняется потоком транспортирующего газа.

Таким образом, основными параметрами, определяющими движение капли, является скорость, которую капля приобрела при вылете из зоны диспергирования, а также характерное расстояние L .

В такой постановке значение L определяется соотношением [133]:

$$L = \frac{4 \rho_{\text{ш}} D}{3 \rho C_f}, \quad (2.21)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность шлака; ρ – плотность азота при температуре раздувки шлака; D – диаметр капли шлака; C_f – коэффициент сопротивления.

При течении газа в турбулентных условиях коэффициент сопротивления равен 0,44.

Уравнение движения капли шлака в простейшей форме в безразмерном виде можно записать следующим образом [131]:

$$dW/dt = -\underline{W}^2, \quad (2.22)$$

где \underline{W} – скорость капли шлака в безразмерном виде.

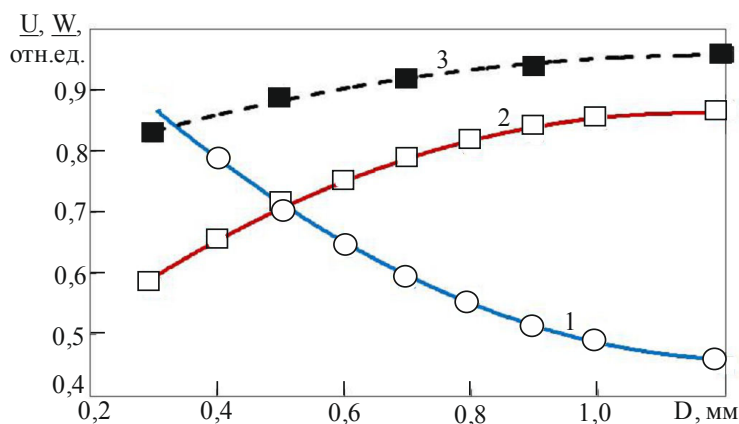
При начальных условиях $\underline{t} = 0$, $\underline{W} = 1$ решение можно записать в следующем виде [131]:

$$\underline{W} = (\underline{t} + 1)^{-1}, \quad (2.23)$$

где \underline{t} – время в безразмерном виде.

Расчетные значения радиальной безразмерной составляющей скорости капли после ее отрыва от основного объема шлака и полной безразмерной скорости капли вблизи футеровки конвертера представлены на рисунке 2.8. Радиальную безразмерную скорость капли шлака (\underline{U}) рассчитывали относительно

радиальной скорости вихревой струи, а полную безразмерную скорость (\underline{W}) – относительно максимальной скорости капля шлака при их разгоне.



1 – радиальная безразмерная скорость капли после отрыва от основного объема шлака; 2 и 3 – полная безразмерная скорость капли у футеровки конвертера при нормальных условиях и при температуре 600°C

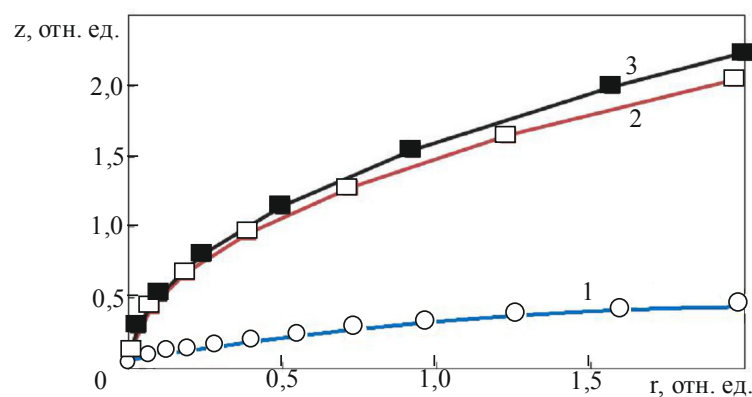
Рисунок 2.8 – Зависимость скорости капли шлака от ее диаметра [149]

Струя подаваемого на раздувку шлака азота, истекая из сопла фурмы, имеет относительно низкую температуру, однако быстро подвергается нагреву, распространяясь в высокотемпературных условиях рабочего пространства конвертера [150]. Как видно (рисунок 2.8), безразмерная скорость движения капель вблизи футеровки конвертера при различной температуре газового потока отличаются незначительно. В такой постановке задачи базовые расчеты выполнены для нормальных условий (т.е. для холодного газа в конвертере), а основные расчеты выполнены для условий при разогреве транспортирующего газа до 600 °С. Даже для частиц диаметром 0,3 мм относительная скорость около футеровки равна 0,83. Таким образом, скорость капли при ее движении в высокотемпературной среде в объеме конвертера изменится незначительно.

На разгон капли шлака высокоскоростным потоком транспортирующего газа значительное влияние оказывает размер этой капли. На рисунке 2.8 показано, что крупные частицы шлака приобретают меньшую скорость, поэтому они будут

подниматься на меньшую высоту при нанесении на футеровку по сравнению с мелкими каплями, вследствие своей большей инерции при взаимодействии с потоком газа.

Результаты расчета траектории движения капель шлака диам. 0,3 – 1,2 мм на участке разгона потоком нейтрального газа представлены на рисунке 2.9 (по оси ординат – относительная безразмерная высота (z), на которую поднимается капля при разбрызгивании шлака, по оси абсцисс – относительное безразмерное расстояние (r), на которое удаляется капля шлака от зоны диспергирования).



Линии 1, 2, 3 соответствуют значениям диаметра капли и отношения незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревого газового потока 0,3 – 1,2 и 0,2; 0,3 и 1,0; 1,2 и 1,0; мм и отн. ед.

Рисунок 2.9 – Изменение траектории движения капли шлака разного диаметра на участке ее разгона [149]

Данные приведены для вихревых струй газа с отношением незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи (σ) от 0,2 до 1. Этот диапазон охватывает практически все возможные варианты раздувки шлака с использованием вихревой фурмы. Как видно (рисунок 2.9), отношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи оказывает определяющее влияние на траекторию движения капель шлака. Формирование струи с $\sigma = 0,2$ позволяет эффективно ошлаковывать нижние горизонты футеровки конвертера, использование струй с $\sigma = 1$ позволяет

направлять брызговинос капель шлака на верхние горизонты огнеупорной кладки агрегата. Результаты расчета для капель различного размера имеют близкие значения, что обусловлено безразмерной постановкой задачи.

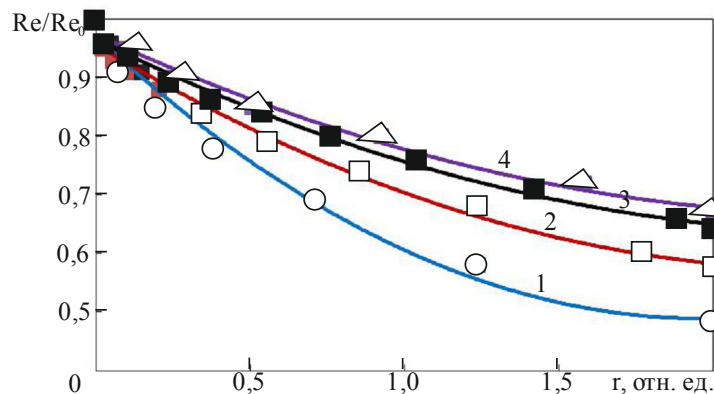
С целью оценки влияния структуры потока транспортирующего газа на поведение капель шлака выполнен расчет величины относительного безразмерного числа Рейнольдса для условий обтекания капель различного диаметра потоком газа (рисунок 2.10). Число Рейнольдса определяли по разнице полных относительных скоростей капли W и потока газа V [134]:

$$V_S = [(V_\phi - W_\phi)^2 + (V_r - W_r)^2 + (V_z - W_z)^2]^{1/2}. \quad (2.24)$$

Таким образом, безразмерное число Рейнольдса имеет вид [134]:

$$Re/Re_0 = \{1/r^2 + [P^2\tau^3/3 - (1 - 1/r^2)^{1/2}]^2 + (\sigma - z)^2\}^{1/2}, \quad (2.25)$$

где P – давление среды.



1 – $D = 0,3$ мм; 2 – $D = 0,6$ мм; 3 – $D = 0,9$ мм; 4 – $D = 1,2$ мм;

Рисунок 2.10 – Относительное число Рейнольдса на участке разгона капли шлака при различном диаметре капли [149]

Так как $(\sigma - z)^2 = \sigma^2 \exp(-2P\tau)$, то окончательно получим [142]:

$$Re/Re_0 = \{1/r^2 + [P^2\tau^3/3 - (1 - 1/r^2)^{1/2}]^2 + \sigma^2 \exp(-2P\tau)\}^{1/2}. \quad (2.26)$$

Анализ характера уменьшения относительного числа Рейнольдса (Re/Re_0) при увеличении относительного безразмерного расстояния (r), на которое удаляется капля шлака при разбрызгивании, свидетельствует, что при движении капли ее скорость постепенно выравнивается со скоростью потока транспортирующего газа. С уменьшением диаметра капель также происходит закономерное уменьшение значения Re/Re_0 , таким образом скорость движения мелких капель незначительно отличается от скорости движения окружающего ее газа. Капли небольшого диаметра фактически витают в потоке транспортирующего газа, в то же время крупные капли шлака не испытывают такого сильного влияния со стороны потока закрученного газа и продолжают двигаться по инерции к футеровке конвертера.

Выводы

1) Методами физического моделирования высокотемпературных процессов исследованы особенности взаимодействия газовых струй с жидкостью при реализации технологии раздувки шлака на футеровку конвертера. Установлен механизм и гидрогазодинамические режимы взаимодействия вихревой газовой струи со шлаковым расплавом.

2) Численными экспериментами установлено, что при реализации технологии нанесения защитного покрытия на футеровку конвертера с использованием вихревой раздувки шлакового расплава размер частиц, выносимых из зоны взаимодействия, определяется скоростью газового потока и расходом газа, при этом снижение вязкости расплава способствует уменьшению минимального размера частиц.

3) Проанализированы особенности движения капель шлака, образующихся при раздувке расплава вихревыми газовыми струями в кислородном конвертере.

Установлена зависимость между параметрами движения брызг шлака различного диаметра и характеристиками вихревой струи. Определено оптимальное для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера соотношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, равное 0,2 – 1,0 отн. ед.

4) Установлено, что на параметры движения мелких капель шлака большое влияние оказывает аэродинамика транспортирующего газа, а поведение крупных капель шлака зависит от скорости газового потока только в начале движения, в дальнейшем его влияние становится незначительным. При этом траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется соотношением незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи.

3 Исследование и разработка рациональных параметров эксплуатации специальных дутьевых устройств для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку большегрузных конвертеров

3.1. Этапы разработок и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для проведения «горячих» ремонтов футеровки большегрузных конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Как показал выполненный анализ (глава 1) в течение последних двух десятилетий общепризнанным и эффективным решением (методом) выполнения «горячих» ремонтов является разработка конструкций специальных дутьевых устройств и технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров с их использованием.

В то же время следует констатировать тот факт, что, несмотря на наличие оригинальных отечественных разработок специальных дутьевых устройств, в повседневной практике работы большинства конвертерных цехов для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку, как правило, используются обычные кислородные фурмы, применяемые для кислородной продувки конвертерной ванны.

Такой подход имеет целый ряд серьезных технологических недостатков, к которым можно отнести [114, 118]:

- использование кислородной фурмы для продувки ванны и раздувки шлака сопровождается более интенсивным образованием шлакометаллической настыви на стволе фурмы, что ведет к ухудшению эксплуатационных показателей, снижению стойкости фурмы и увеличению трудозатрат;

- присадка по ходу продувки магниезиальных шлакообразующих материалов с целью формирования шлака с повышенными огнеупорными свойствами для нанесения шлакового гарнисажа сопровождается ухудшением дефосфорации и десульфурации расплава, развитием явления «сворачивания»

шлака и интенсивного выноса капель металла с заметалливанием технологического оборудования;

– на футеровку конвертера раздувается только часть подготовленного шлака, что приводит к нерациональному использованию дорогостоящих магнезиальных шлакообразующих материалов.

Следует особо отметить, что в условиях эксплуатации 350-т конвертеров с использованием 4-х сопловой фурмы (сопла Лаваля критического диаметра 54 мм, расположенные под углом 15° к вертикали) с самого начала работы цеха был освоен ступенчатый режим кислородной продувки с понижением расхода кислорода в период интенсивного обезуглероживания ванны для предупреждения возникновения выбросов, а также сворачивания шлака и выноса металла. При этом расчетные параметры и профиль сопел кислородной фурмы не соответствуют оптимальной интенсивности подачи азота для раздувки шлака и нанесения огнеупорного слоя на футеровку. Поэтому при создании рациональной технологии «горячих» ремонтов футеровки приходится искать компромиссные технические решения. В данных условиях в цехе ремонт футеровки выполняется следующими технологическими способами:

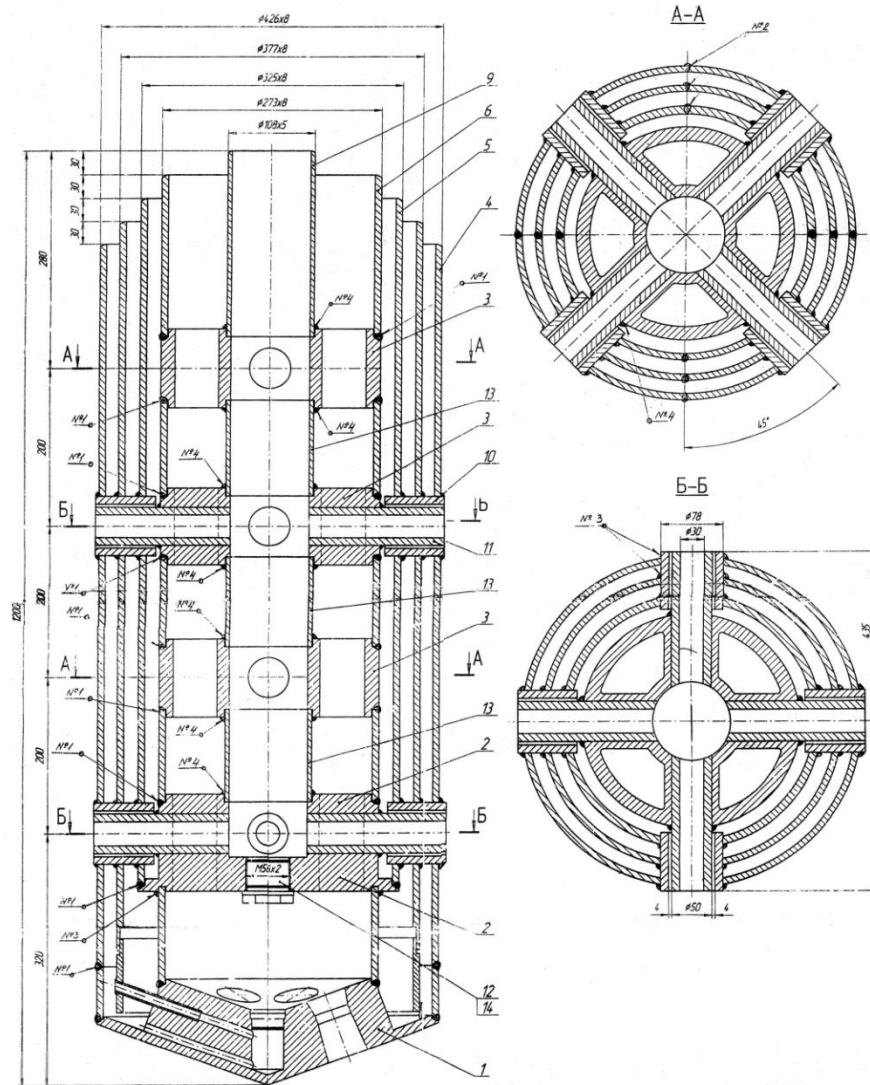
– нанесением шлакового гарнисажа раздувкой подготовленного конечного шлака азотными струями при использовании штатной 4-х сопловой кислородной фурмы и расходе азота $800 - 1200 \text{ м}^3/\text{мин}$;

– факельным торкретированием с подачей торкрет-массы на основе обожженного доломита или периклазового порошка и использованием вертикальной торкрет-фурмы.

Таким образом, поскольку в условиях ККЦ № 2 дополнительно к нанесению шлакового гарнисажа на футеровку периодически выполняется факельное торкретирование, в свое время было признано целесообразным использовать конструкцию специальной фурмы, совмещающей операции нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования [114].

С использованием комбинированной гарнисажной фурмы (рисунок 3.1) отработанная технология позволила значительно улучшить показатели работы

конвертеров. Такая фурма совмещает в себе элементы конструкции торкрет-фурмы и гарнисажной фурмы и позволяет выполнять операции факельного торкретирования и нанесения шлакового гарнисажа одновременно, последовательно или, при необходимости, с оптимизированным интервалом.



- 1 – головка с соплами Лаваля для раздувки шлака; 2 – торкрет-блок концевой; 3 – промежуточные торкрет-блоки; 4 – наружная труба; 5, 6 – трубы подвода кислорода и азота соответственно; 7 – труба подвода воды; 8 – вставки между кислородными соплами; 9 – труба подвода торкрет-массы в газе-носителе; 10 – сопло для подачи кислорода; 11 – сопло для подачи торкрет-массы; 12 – пробка; 13 – трубчатые вставки между торкрет-блоками.

Рисунок 3.1 – Конструкция наконечника комбинированной гарнисажной фурмы

Использование такого дутьевого устройства позволяет внедрять высокоогнеупорные частицы торкрет-массы непосредственно в формирующийся на стенках футеровки гарнисажный слой.

В данном варианте торкрет-гарнисажная фурма состоит из пяти концентрично расположенных и входящих одна в другую цельнотянутых стальных труб (рисунок 3.1):

- по центральной трубе диаметром 108 мм подается торкрет-масса;
- по кольцевому сечению между трубами диаметром 108 мм и 273 мм подается азот для раздувки шлака для нанесения шлакового гарнисажа;
- по кольцевому сечению между трубами диаметром 325 мм и 273 мм – кислород на торкретирование;
- соответственно по двум крайним кольцевым каналам (между трубами диаметром 377 мм и 325 мм и, 426 мм и 377 мм) производится подвод и отвод охлаждающей воды.

Технические характеристики водоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы представлены в таблице 3.1.

В основу конструкции наконечника комбинированной торкрет-фурмы положен блочный вариант размещения различных по конструкции и назначению сопел, позволяющий существенно уменьшить число сварных швов и упростить изготовление самой фурмы [119].

Для выполнения операции торкретирования в фурме смонтированы специальные торкрет-блоки. В наконечнике фурмы (рисунок 3.1) количество сопел для торкретирования увеличено до 16 при расположении последних в четыре яруса по четыре сопла из нержавеющей стали в каждом. Оси сопел каждого последующего яруса смещены относительно друг друга на 45° с расстоянием между ярусами порядка 200 мм. Каждое сопло внутреннего диаметра 58 мм закреплено с помощью сварки в трубах подвода кислорода, подвода и отвода охлаждающей воды, при этом концентрично расположенные кислородные кольцевые сопла с зазором 4 мм опоясывают каждое торкрет-сопло.

Четыре сопла Лавалья размещены в цельноточенной стальной головке для подачи азота под углом 20° к вертикальной оси фурмы. При этом в головке между соплами Лавалья выполнены сверления для прохождения охлаждающей воды.

Таблица 3.1 – Технические характеристики водоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

Техническая характеристика	Единица измерения	Величина
1. Давление воды в головке фурмы	МПа	1,0
2. Давление азота перед соплами	МПа	1,2
3. Давление кислорода перед соплами	МПа	1,4-1,6
4. Характерный расход торкрет-массы	кг/мин	750-1000
5. Расход азота	м ³ /мин	800-1200
6. Характерный расход кислорода при торкретировании	м ³ /мин	160-250
7. Расход охлаждающей воды	м ³ /час	300-350
8. Содержание кокса в торкрет-массе	%	20-30
9. Количество торкрет-сопел	шт	16
10. Количество гарнисажных сопел Лавалья	шт	4

В процессе эксплуатации работа комбинированной торкрет-гарнисажной фурмы осуществляется следующим образом.

Азот с расходом 800-1200 м³/мин подается по кольцевому зазору между трубами диаметром 108 и 273 мм (см. рисунок 3.1), проходит по межсопловым проточкам четырех стальных торкрет-пакетов к гарнисажной головке и истекает в рабочее пространство конвертера в виде четырех, наклонных под углом 20° к оси фурмы, сверхзвуковых газовых струй, обеспечивающих направленный вынос шлака на футеровку конвертера.

По центральной трубе диаметром 108 мм в потоке несущего газа подается торкрет-масса в количестве до 1000 кг/мин, которая через шестнадцать торкрет-сопел в виде газопорошковых струй под углом 90° к оси фурмы поступает в полость агрегата (см. рисунок 3.1). В свою очередь, кислород с расходом до 450-500 м³/мин по кольцевому зазору между труб диаметром 325 и 273 мм поступает к кислородным соплам и в виде шестнадцати кольцевых коаксиальных струй,

охватывающих газопорошковые струи с торкрет-массой, подается в агрегат с образованием горящих факелов, способствующих разогреву и размягчению огнеупорных частиц торкрет-массы с нанесением последней на футеровку конвертера.

Как показывает накопленный опыт [114], возможны четыре основных технологических варианта «горячих» ремонтов футеровки конвертера с использованием фурмы:

1 – формирование гарнисажа из специально подготовленного конечного шлака проведенной плавки с последующим торкретированием футеровки факельным способом;

2 – торкретирование футеровки конвертера факельным способом с последующим формированием гарнисажа путем раздувки конечного шлака проведенной плавки;

3 – формирование гарнисажа из специально подготовленного конечного шлака проведенной плавки;

4 – торкретирование футеровки конвертера факельным способом.

При этом выявлены и отрицательные стороны такой технологии ремонта футеровки, в том числе:

- значительный вес дутьевого устройства, более сложная конструкция в сравнении с используемой штатной фурмой для факельного торкретирования, что вызывает осложнения при установке фурмы в стенд;

- отсутствие компенсирующих устройств теплового расширения наружной трубы в головке торкрет-фурмы, что может привести к разрушению сварных швов и прекращению работы устройства;

- повышенные трудозатраты при изготовлении головок фурмы.

Таким образом, комплексная технология «горячих» ремонтов футеровки конвертеров с использованием гарнисажных фурм позволяет обеспечить повышение стойкости футеровки и улучшить большинство эксплуатационных и технико-экономических показателей процесса. Надежная и продолжительная работа фурм в течение всей кампании конвертера по футеровке предопределяет

необходимость разработки и проектирования теоретически обоснованной системы охлаждения таких дутьевых устройств.

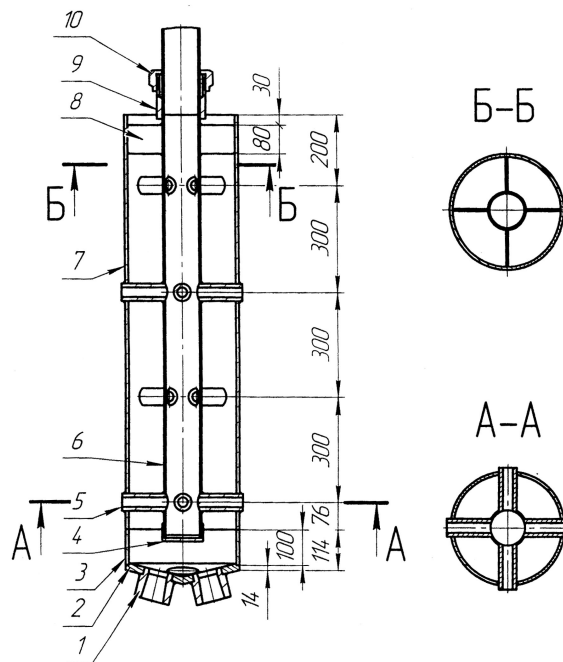
В дальнейшем с целью устранения указанных недостатков и совершенствования технологии «горячих» ремонтов футеровки были разработаны упрощенные конструкции газоохлаждаемых торкрет-гарнисажных фурм, выполняющих такие же технологические операции [120].

При этом предусматривается при той же стойкости футеровки обеспечить ресурсо- и энергосберегающий эффект за счет исключения расхода технической воды на охлаждение торкрет-гарнисажной фурмы и снижения металлоемкости конструкции дутьевого устройства. Дополнительно появляется возможность размещения такой фурмы в запасном стенде, с возможностью использования после каждой плавки в режиме только нанесения шлакового гарнисажа или с одновременным факельным торкретированием футеровки конвертера.

Отсутствие металла в конвертере в период нанесения гарнисажа и, соответственно, снижение величины тепловых потоков, воздействующих на дутьевое устройство, позволило изменить конструкцию фурмы и использовать в качестве охлаждающего фурму агента азот, подаваемый на раздувку шлака (рисунок 3.2, 3.3) [119, 120].

Компенсация возникающих термических напряжений в этом случае обеспечивается с помощью сальникового компенсатора, установленного на внутренней трубе в месте присоединения головки к основному стволу фурмы, снабженному в верхней части патрубками для подвода азота и торкрет-массы.

Газоохлаждаемая комбинированная торкрет-гарнисажная фурма для «горячего» ремонта футеровки 350-т конвертеров (рисунок 3.2), существенно упрощена и выполнена в виде двух концентрично расположенных стальных труб. Внутренняя труба обеспечивает подачу торкрет-массы в потоке кислорода через боковые цилиндрические сопла, размещенные в 4 яруса по высоте фурмы в пределах рабочего пространства агрегата, при этом сопла каждого последующего яруса смещены относительно друг друга на 45°. Наружная труба обеспечивает подачу азота к торцевому наконечнику с 4 соплами Лавали для раздувки шлака.



1 – сопла Лавалья; 2 – тарелка; 3 – торцевой наконечник; 4 заглушка; 5 – боковые цилиндрические сопла; 6 – внутренняя труба для подачи торкрет-массы и кислорода; 7 – наружная труба; 8 – фиксаторы; 9 – патрубок сальникового компенсатора; 10 – гайка компенсатора.

Рисунок 3.2 – Конструкция газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы для 350-т конвертера [120]

В такой компоновке газообразный азот, подаваемый для раздувки шлака, параллельно обеспечивает охлаждение дутьевого устройства, при нахождении последнего в высокотемпературных условиях сталеплавильного агрегата. Технические характеристики газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы представлены в таблице 3.2.

Как и ранее, предусматривается использование торкрет-гарнисажных фурм по двум технологическим вариантам «горячих» ремонтов футеровки конвертеров:

- нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера посредством раздувки подготовленного конечного шлака;
- совмещение операций раздувки шлака и факельного торкретирования.

Таблица 3.2 – Технические характеристики газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

Техническая характеристика	Единица измерения	Величина
1. Давление азота перед соплами	МПа	1,2
2. Давление кислорода перед соплами	МПа	1,4-1,6
3. Расход торкрет-массы	кг/мин	до 1500
4. Характерный расход торкрет-массы (цилиндр, конус и горловина агрегата)	кг/мин	750-1000
5. Расход азота	м ³ /мин	800-1200
6. Характерный расход кислорода при торкретировании	м ³ /мин	до 450-500
7. Расход (содержание) кокса в торкрет-массе	%	20-30
8. Расход торкрет-массы на одну операцию	т	4,5-5,0
9. Продолжительность одновременной операции ошлакования и торкретирования	мин	2-4
10. Геометрические размеры фурмы:		
- диаметр внешней трубы	мм	325x8
- диаметр внутренней трубы	мм	108x6
- количество сопел Лавалья	шт.	4
Параметры в головке: D _{вх}	мм	62
Параметры в головке: D _{кр}	мм	52
Параметры в головке: D _{вых}	мм	60
- боковые цилиндрические сопла, D _{вн}	мм	50
- боковые цилиндрические сопла, D _{внутр}	мм	30
11. Высота расположения торца фурмы относительно поверхности шлаковой ванны	м	0,5-1,0

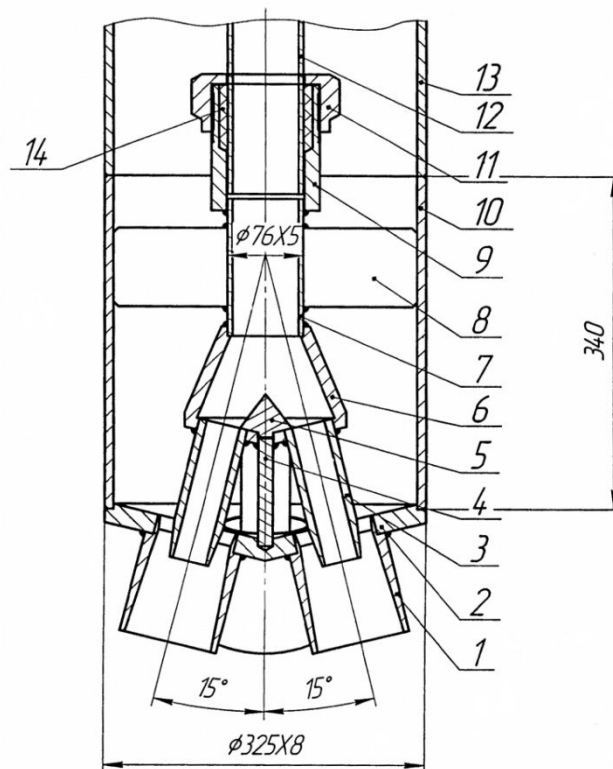
При этом в торкрет-факелах происходит подогрев огнеупорной составляющей торкрет-массы с дальнейшим ее вдуванием («впрессовкой») в шлаковый гарнисажный слой, наносимый на стены конвертера посредством раздувки азотными струями конечного шлака.

В дальнейшем в качестве разработанных проектных предложений для цеха была представлена конструкция газопорошковой гарнисажной фурмы также с газовым охлаждением (рисунок 3.3) [120].

Как известно, в целом, технология нанесения шлакового гарнисажа представляет компромиссный вариант обеспечения жидкоподвижности шлака в

конвертере по ходу продувки и образования высокостойкого гарнисажа на поверхности футеровки при охлаждении и кристаллизации шлака. Поэтому важным в процессе раздувки шлака является охлаждение капель и брызг шлака до температуры ниже точки плавления непосредственно при соприкосновении с футеровкой и одновременное приобретение формируемым гарнисажом необходимых огнеупорных свойств.

Таким образом, желательным является обеспечение формирования шлаковых капель с необходимыми физико-химическими свойствами непосредственно в зонах совместного воздействия нейтральных газовых струй с огнеупорным порошком на шлаковый расплав с последующим направленным движением частиц шлака и намораживанием гарнисажа на футеровку конвертера.



- 1 – азотное сопло; 2 – нижняя тарелка; 3 – газопорошковое сопло; 4 – фиксатор; 5 – рассекатель; 6 – верхняя тарелка; 7 – трубка (вставка); 8 – ребро центрирующее; 9 – компенсатор; 10 – труба (вставка); 11 – гайка накидная; 12 – внутренняя труба; 13 – наружная труба; 14 – шнуровой асбест

Рисунок 3.4 – Конструкция газоохлаждаемой газопорошковой фурмы [120]

Газоохлаждаемая газопорошковая гарнисажная фурма для «горячего» ремонта футеровки 350-т конвертеров (рисунок 3.3) представлена в виде двух концентрично размещенных стальных труб: наружной, диаметром 325 мм для подачи азота к торцевому наконечнику с 4 соплами Лавалья, выступающими за торец тарелки и расположенными по кругу с углом наклона к вертикали 15° , и внутренней, диаметром 76 мм для подачи порошкообразных огнеупорных материалов в потоке транспортирующего азота, через закрепленные под углом 15° к вертикали 4 газопоршковых цилиндрических сопла. При этом каждая газопорошковая струя окружена кольцевой газовой оболочкой сверхзвукового азота, которая формируется при вдувании азота через кольцевой зазор между соплами. Технические характеристики газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы представлены в таблице 3.4.

Для формирования оптимальной структуры двухфазной газопорошковой струи предложено формировать потоки для каждого сопла Лавалья, что обеспечивает возможность получения надлежащей структуры шлакового гарнисажа. Равномерное нанесение шлакового гарнисажа по всей высоте поверхности футеровки конвертера можно обеспечить при использовании 4-х сопловой головки, имеющей составные концентричные сопла типа «труба в трубе», расположенные относительно вертикальной оси фурмы по окружности (рисунок 3.3). Головка и ствол фурмы в этом случае изготовлены из рядовой углеродистой стали.

Конструкция газопорошковой гарнисажной фурмы (рисунок 3.3) выполнена с учетом следующих требований:

- сопла наконечника спроектированы на расход азота $1000 - 1200 \text{ м}^3/\text{мин}$, что обеспечивает повышение динамического воздействия газовых или газопорошковых струй на шлаковый сплав с равномерным «набрызгиванием» шлака на футеровку;
- через цилиндрические сопла наконечника фурмы в потоке азота в шлаковую ванну подается магнезиальная торкрет-масса, что обеспечивает

формирование необходимых физико-химических свойств гарнисажного шлака непосредственно при попадании его на футеровку.

Таблица 3.4 – Технические характеристики газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы

Техническая характеристика	Единица измерения	Величина
1. Давление азота перед соплами	МПа	1,2
2. Расход магнезиальных материалов	кг/мин	350-600
3. Расход азота на раздувку шлака	м ³ /мин	750-1050
4. Характерный расход азота для магнезиальных материалов)	м ³ /мин	150-250
5. Расход магнезиальных материалов на одну операцию	т	0,5-5,0
6. Продолжительность операции ошлакования	мин	3-4
7. Геометрические размеры фурмы:		
- диаметр внешней трубы	мм	325
- диаметр внутренней трубы	мм	76
- количество сопел Лаваля	шт.	4
- количество газопорошковых цилиндрических сопел	шт.	4
- сопло Лаваля		
D _{вх}	мм	79
D _{кр}	мм	75
D _{вых}	мм	90
- газопорошковые цилиндрические сопла		
D _{внутр}	мм	34
8. Высота расположения торца фурмы относительно поверхности шлаковой ванны	м	0,5-1,0

Азот для раздувки шлаковой ванны подается в кольцевой зазор между внутренней 12 и наружной трубой 13, в дальнейшем поступает к нижней тарелке 2 и в виде четырех сверхзвуковых азотных струй вдувается в рабочее пространство агрегата по кольцевым зазорам между внутренними цилиндрическими соплами 3 и внешними соплами Лаваля 1.

Магнезиальная торкрет-масса в потоке азота подается через внутреннюю трубу 12 и в виде газопорошковых струй вдувается в полость конвертера через четыре цилиндрических сопла 3. При этом газопорошковые струи окружены кольцевой оболочкой сверхзвукового азота, которая формируется при истечении азота через кольцевой зазор между соплами.

За счет вдувания магнезиальной торкрет-массы в потоке азота в объеме шлаковой ванны обеспечивается формирование капель с необходимыми физико-химическими свойствами непосредственно в пределах зон взаимодействия с дальнейшим набрызгиванием таких капель шлака на футеровку.

Следует учитывать, что азот имеет более низкую теплоемкость по сравнению с водой. Соответственно, он обладает меньшей способностью охлаждать дутьевое устройство, находящееся в высокотемпературных условиях рабочего пространства конвертера. Несмотря на то, что при раздувке шлака азотом в агрегате отсутствует металл и фурма подвергается меньшему воздействию тепловых потоков по сравнению с периодом продувки конвертерной ванны технически чистым кислородом, тем не менее могут возникать проблемы с ее охлаждением. Поэтому для разработки эффективной системы охлаждения и обеспечения работоспособности специальных дутьевых устройств, оценки возможности применения азота как охлаждающего реагента необходимо дополнительно провести теоретические исследования, в том числе выполнить оценку тепловых нагрузок, воспринимаемых газоохлаждаемыми торкрет-гарнисажной и газопорошковой гарнисажной фурмами при их работе в высокотемпературных условиях рабочего пространства конвертера, а также определить степень нагрева конструктивных элементов фурм и используемого для раздувки шлака азота.

Получение такой информации позволит более обоснованно проектировать системы охлаждения специальных дутьевых устройств, применяемых для горячих ремонтов футеровки конвертеров.

3.2 Проектирование системы охлаждения и расчет характеристик теплообмена газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

Выполненные ранее экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях [114 – 122] позволяют сформулировать основные технические подходы и конструктивные решения по созданию специальной группы дутьевых устройств для ремонта футеровки конвертерных агрегатов. По мнению авторов [118 – 120], безусловно, перспективным является проектирование и создание дутьевых устройств без водяного охлаждения, т.е. охлаждающихся за счет прохождения через фурму газового потока, что значительно упрощает технологию сборки и, в целом, конструкцию фурмы. Поэтому в качестве первостепенных приоритетных задач разработки такой системы охлаждения фурмы рассматривали вопросы характеристик теплообмена для данной системы в наиболее теплонпряженных условиях работы, т.е. в процессе торкретирования футеровки агрегата.

В соответствии с постановкой задачи торкрет-гарнисажная фурма, введенная в «горячий» конвертер, подвергается нагреву в основном излучением от внутренней поверхности футеровки и в незначительной степени – свободной конвекцией от газов, заполняющих рабочее пространство конвертера. Такой теплообмен происходит в течение первых секунд, так как при включении фурмы, в конвертере начинается процесс горения кокса с выделением CO_2 и H_2O , появляются ярко светящиеся факелы из раскаленных частиц торкрет массы. Продукты горения кокса разбавляются азотом, подаваемым для разбрызгивания шлака, но, тем не менее, они, благодаря наличию CO_2 , H_2O и твердых взвешенных микрочастиц, излучают тепло как на футеровку конвертера, так и на гарнисажную торкрет-фурму. Кроме того, устремляясь к выходу через горловину конвертера, газы в продольном направлении омывают фурму, отдавая ей тепло еще и конвекцией.

Наличие твердых микрочастиц увеличивает степень черноты газов в конвертере, повышая их поглотительную и, соответственно, излучательную

способности, в связи с чем возрастает поток лучистой энергии от газов к фурме, но, в то же время, уменьшается поток от футеровки. Насколько увеличивается излучение газов и уменьшается излучение от футеровки – определить невозможно, так как неизвестна концентрация пыли в газах, размеры, форма и степень черноты частиц. Поэтому теплообмен между газами, футеровкой и фурмой можно рассчитать только приближенно. Общая же схема такого процесса очевидно аналогична с теплообменом в пламенной печи при нагреве металла [151, 152]. В дальнейшем принято, что источником тепла в конвертере в условиях отсутствия жидкого металла являются продукты горения кокса, разбавленные азотом.

Азот, проходящий по кольцевому каналу внутри торкрет-фурмы, прозрачен для тепловых лучей, как двухатомный газ, и поэтому способен получать и отдавать тепло только конвекцией. Протекая по каналу, он получает тепло от наружной трубы фурмы, нагревается и, в то же самое время, отдает часть тепла внутренней трубе, по которой подается смесь кислорода с торкрет-массой. В результате смесь несколько нагревается, поскольку количество тепла, отдаваемого азотом внутренней трубе, в несколько раз меньше получаемого им от наружной, а массовый расход кислорода и торкрет-массы практически равен расходу азота. Некоторое количество тепла внутренняя труба фурмы воспринимает еще от наружной трубы излучением, поскольку азот лучепрозрачен.

Наличие сопел, проходящих через кольцевой канал в поперечном направлении, для подачи торкрет-массы турбулизировывает поток азота, увеличивая конвективный теплообмен между наружной и внутренней трубой фурмы. Однако это можно считать незначительным, потому что охватывает ограниченный объем вдоль ряда сопел; при этом следует учитывать, что расстояние между соплами достаточно велико по отношению к их диаметру.

Процессы теплообмена при охлаждении торкрет-гарнисажной фурмы азотом не стационарны: существует большой перепад температуры между газами, футеровкой и фурмой в начальный момент, а в дальнейшем происходит

значительное изменение температурных условий, что затрудняет оценку конвективного теплообмена в кольцевом зазоре фурмы. Поэтому принято, что теплоперенос стационарен, а все расчеты выполнены для условий полного разогрева дутьевого устройства. Значения температур наружной трубы торкрет-фурмы, азота перед соплами Лавалья и внутренней трубы задавались предварительно, а затем уточнялись.

В рассматриваемых условиях система состоит из футеровки конвертера и торкрет-фурмы. Линейные размеры рабочего пространства и геометрические параметры фурмы представлены на рисунке 3.4. Для расчета как лучистого, так и конвективного теплообмена выполнены расчеты геометрических характеристик системы фурма – конвертер, в том числе необходимые размеры, площади и объемы системы рассматриваемых тел (см. таблицу 3.4).

Для определения излучающей способности газовой среды выполнен расчет ее характеристик при совместном выполнении операций торкретирования и раздувки шлака азотом.

В процессе факельного торкретирования кокс, подаваемый в составе торкрет-массы, сгорает в техническом кислороде, состоящем (по объему) из 95% O_2 и 5% N_2 . В соответствии с [151] для условий АО ЕВРАЗ ЗСМК кокс имеет следующий химический состав (масс. %): $C^r = 86,16\%$; $H^r = 0,38\%$; $O^r = 0,29\%$; $S^r = 0,39\%$; $N^r = 1,18\%$; $A^r = 9,8\%$; $W^r = 1,8\%$.

Тогда низшая рабочая теплота горения кокса:

$$Q_H^r = 339 \cdot C^r + 1256 \cdot H^r + 109(S^r - O^r) - 25(9H^r + W^r), \quad (3.1)$$

$$Q_H^r = 339 \cdot 86,19 + 1256 \cdot 0,38 + 109(0,39 - 0,29) - 25(9 \cdot 0,38 + 1,8) =$$

$$= 29565,9 \text{ кДж/кг кокса.}$$

Количество продуктов горения можно рассчитать по стехиометрическим уравнениям реакций окисления горючих компонентов. При этом получается:

$$\text{углекислого газа } CO_2 \quad \frac{22,4}{12} \cdot 86,16 \cdot 10^{-2} = 1,6083 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\text{водяного пара } H_2O \quad \left(\frac{22,4}{2} \cdot 0,38 + \frac{22,4}{18} \cdot 1,8 \right) \cdot 10^{-2} = 0,0224 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\text{сернистого газа } SO_2 \quad 0,7 \cdot 0,39 \cdot 10^{-2} = 0,0027 \text{ м}^3/\text{кг};$$

азота N_2 $-(0,8 \cdot 1,18 + 1,7161 \cdot 5) \cdot 10^{-2} = 0,0952 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Общий выход продуктов горения составляет $1,7286 \text{ м}^3/\text{кг}$ кокса.

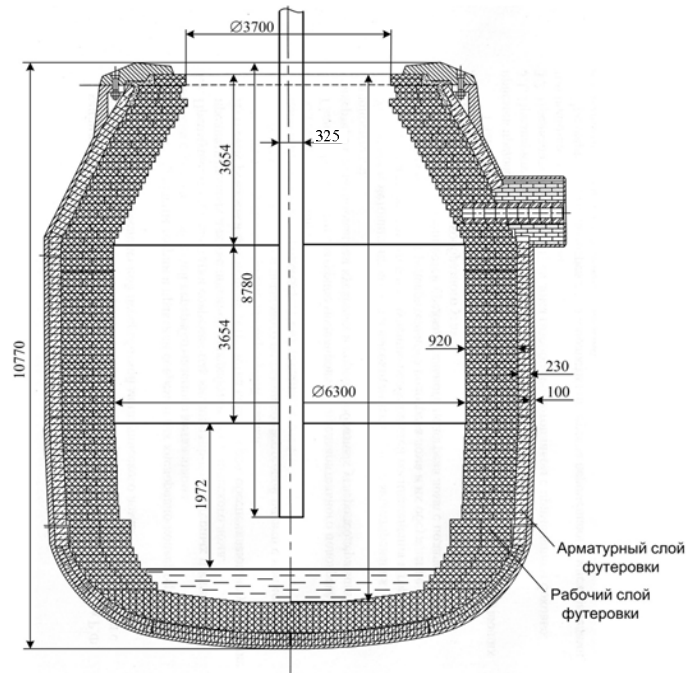


Рисунок 3.5 – Общий вид системы при работе газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы.

Теоретический расход технического кислорода на 1 кг кокса определяли следующим образом:

$$Z_o = \left[\frac{22.4}{12} \cdot C^r + \frac{11.2}{2} \cdot H^r + \frac{22.4}{32} (S^r - O^r) \right] \left(1 + \frac{5}{95} \right) \cdot 10^{-2}, \quad (3.2)$$

$$Z_o = 1,7161 \text{ нм}^3/\text{кг кокса},$$

Водяной пар образуется при горении водорода и при испарении влаги кокса. Азот поступает из кокса и с техническим кислородом, подаваемым для сжигания кокса.

Состав продуктов горения (объемные %):

$$CO_2 = \frac{1,6083}{1,7286} \cdot 100 = 93,04\%; \quad H_2O = \frac{0,0224}{1,7286} \cdot 100 = 1,30\%;$$

$$SO_2 = \frac{0,0027}{1,7286} \cdot 100 = 0,15\% \quad N_2 = \frac{0,0952}{1,7286} \cdot 100 = 5,51\%.$$

При расходе торкрет-массы 750 – 1000 кг/мин и содержании кокса в ней 20-30% средний расход кокса составит:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{2} \cdot 10^{-2} = 218,75 \text{ кг/мин или } 3,6452 \text{ кг/с}.$$

Таблица 3.5 – Геометрические параметры системы при работе газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

№ п/п	Параметр	Обозначение	Величина
1	Площадь свободного сечения горловины, м^2	S_{Γ}	10,604
2	Площадь свободного сечения цилиндрической части конвертера, м^2	$S_{\text{ц}}$	31,014
3	Площадь поверхности футеровки верхнего конуса конвертера, м^2	$F_{\text{вк}}$	60,89
4	Объем рабочего пространства верхнего конуса конвертера, м^3	$V_{\text{вк}}$	73,33
5	Площадь цилиндрической части футеровки, м^2	$F_{\text{ц}}$	72,28
6	Объем рабочего пространства цилиндрической части конвертера, м^3	$V_{\text{ц}}$	113,85
7	Площадь поверхности футеровки нижнего конуса конвертера, м^2	$F_{\text{нк}}$	37,15
8	Объем рабочего пространства нижнего конуса конвертера, м^3	$V_{\text{нк}}$	53,08
9	Площадь днища конвертера, м^2	$F_{\text{д}}$	23,82
10	Площадь поверхности фурмы, м^2	$F_{\text{ф}}$	11,74
11	Объем фурмы, м^3	$V_{\text{ф}}$	1,25
12	Объем, занятый газами в конвертере, м^3	V_{Γ}	239
13	Площадь поверхностей, ограничивающих объем газа, м^2	$F_{\text{ог}}$	216,48
14	Площадь внутренней поверхности футеровки конвертера, м^2	$F_{\text{вн}}$	204,74
15	Отношение площадей фурмы и футеровки конвертера	$\varphi_{\text{фф}}$	0,057
16	Эффективная длина луча, м	$l_{\text{эф}}$	4,03
17	Площадь критического сечения азотного сопла, м^2	$S_{\text{с}}$	0,0021

При этом расход кислорода должен быть: $Z_{\text{к}} = 3,6452 \cdot 1,7161 = 6,2555 \text{ нм}^3/\text{с}$,
а выход продуктов горения: $V_{\text{пр}} = 3,6452 \cdot 1,7286 = 6,3011 \text{ нм}^3/\text{с}$.

Азот для раздувки шлака подается под давлением 1,2 МПа через 4 сопла с диаметром критического сечения 52 мм и разбавляет продукты горения кокса, уменьшая их содержание в общей смеси. Процесс смешения происходит очень быстро, потому что струи азота и торкрет-массы, в которых горит кокс,

значительно турбулизируют газовую среду. Поэтому можно считать, что состав газовой смеси выравнивается мгновенно.

Тогда массовый расход азота через 4 сопла:

$$\varphi_N = 4 \cdot S_c \cdot \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \cdot P_N \cdot \gamma_N, \quad (3.3)$$

где S_c – площадь критического сечения сопла Лавалья; $k = C_p/C_v$ – показатель адиабаты, равный 1,4 для двухатомных газов; γ_N – плотность азота перед соплами Лавалья.

После подстановки известных значений:

$$\begin{aligned} \varphi_N &= 4 \cdot 0,0021 \cdot \sqrt{1,4 \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{(1,4+1)/(1,4-1)}} \cdot 1,2 \cdot 10^6 \cdot \gamma_{NK} = \\ &= 6,62385 \cdot (\gamma_{NK})^{0,5}, \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

Плотность азота перед соплом:

$$\begin{aligned} \gamma_{NK} &= \frac{P_N}{R_N \cdot T_N}, \\ \gamma_{NK} &= \frac{1,2 \cdot 10^6}{296,93 \cdot T_{NK}} = \frac{4371,737}{T_{NK}}, \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Объемный расход газовой смеси в конвертере представили как $V_N + V_{\text{пг}}$. Причем объемный расход азота при нормальных условиях равен $V_N = \varphi_N / \gamma_N$. Содержание в смеси газов, участвующих в лучистом теплообмене (CO_2 и H_2O), составляет: $V_{\text{CO}_2} \cdot \varphi_{\text{кокс}} \cdot 100 / V_{\text{гс}}$, $V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \varphi_{\text{кокс}} \cdot 100 / V_{\text{гс}}$. Расчеты выполнены для значений температуры азота перед соплами Лавалья 0; 100; 200; 300 °С. Полученные результаты сведены в таблицу 3.5. Содержание H_2O настолько мало, что его влиянием на теплообмен можно пренебречь, поэтому в расчетах учитывали только содержание CO_2 .

Плотность лучистого теплового потока на поверхность тела определяли с помощью приведенного коэффициента излучения. Численное значение $C_{\text{пр}}$, Вт/(м² · К⁴), зависит от формы и взаимного расположения тел, от их радиационных свойств, в частности – от степеней черноты ε . В конвертере, в процессе торкретирования, в лучистом теплообмене участвуют внутренняя

поверхность футеровки, наружная поверхность торкрет-фурмы и газопылевая среда.

Таблица 3.5 – Параметры газовой смеси

Наименование	Обозначение	Значение			
Конечная температура азота, °C	$t_{Nк}$	0	100	200	300
Плотность азота, кг/м ³	γ_N	16,01	11,72	9,24	7,63
Массовый расход азота, кг/с	φ_N	26,50	22,68	20,14	18,30
Объемный расход азота при выходе из фурмы, м ³ /с	V_N	21,20	18,14	16,11	14,64
Объемный расход газовой смеси, м ³ /с	$V_{гс}$	27,51	24,44	22,41	20,94
Содержание CO ₂ , об. %	CO ₂	21,31	23,98	26,15	27,99
Содержание H ₂ O, об. %	H ₂ O	0,30	0,33	0,36	0,39

Приведенный коэффициент излучения системы газовая смесь – футеровка – торкрет-фурма определяли по выражению [152]:

$$C_{пр} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot \varepsilon_{гс} (1 + \varphi_{\phi к} - \varphi_{\phi к} \cdot \varepsilon_{гс})}{\varepsilon_{гс} (1 + \varphi_{\phi к} - \varphi_{\phi к} \cdot \varepsilon_{гс}) + \varphi_{\phi к} \cdot \varepsilon_{\phi} (1 - \varepsilon_{гс})^2}, \quad (3.5)$$

где: C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт / (м² · К⁴); ε_{ϕ} – степень черноты наружной трубы фурмы с окисленной поверхностью, равная 0,8 – 0,9; $\varepsilon_{гс} = \varepsilon_{CO_2}$ – степень черноты газовой смеси в конвертере, которая зависит от температуры газа, парциального давления и эффективной длины луча $l_{эф}$.

Парциальное давление углекислого газа зависит от общего давления, которое принято равным 98,1 кПа, и объемной доли газа в смеси: $P_{CO_2} = 98,1 \cdot \%CO_2 / 100 = 0,981 \cdot \% CO_2$. Содержание CO₂ в газовой смеси зависит от температуры азота перед соплами Лаваля (таблица 3.5), поэтому $P_{CO_2} \cdot l_{эф}$ будет переменным.

Температуру газов в конвертере и огнеупорной массы при горении кокса оценивали по тепловому балансу процесса горения:

$$\varphi_{\text{кокс}} \cdot Q_H^p = \varphi_{ог} \cdot C'_{ог} \cdot t + \varphi_N \cdot C'_N \cdot t + \varphi_{пг} \cdot C'_{пг} \cdot t. \quad (3.6)$$

Тепло, выделяющееся при горении кокса $\varphi_{\text{кокс}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 107773,6$ кВт; расход огнеупорной массы $\varphi_{\text{ог}} = \frac{12}{2} \cdot \frac{0,75}{60} = 10,9375$ кг/с; расход продуктов горения кокса $V_{\text{пр}} = 6,3011$ м³/с.

Теплоемкости реальных веществ зависят от температуры, поэтому уравнение теплового баланса процесса горения решали методом итераций.

При $t = 1700$ °С и теплоемкости огнеупорной массы $1,61$ кДж / (кг · К) полная энтальпия ее будет равна $10,9375 \cdot 1,61 \cdot 1700 = 29935,9$ кВт.

Расход азота переменный, среднее значение из таблицы 3.5 составляет $21,41$ кг/с. Массовая теплоемкость азота при 1700 °С $C'_{\text{N}} = 1,1737$ кДж/(кг · К), а полная энтальпия $21,41 \cdot 1,1737 \cdot 1700 = 42719,2$ кВт.

Полную энтальпию продуктов горения кокса определяли по объемным величинам – расходу $V_{\text{пр}}$ и объемной теплоемкости.

Теплоемкость продуктов горения при 1700 °С можно определить, как:

$$C_{\text{пр}} = r_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{SO}_2} \cdot C_{\text{SO}_2} + r_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2}, \quad (3.7)$$

$$C_{\text{пр}} = 0,9304 \cdot 2,3743 + 0,013 \cdot 1,8996 + 0,0015 \cdot 2,4110 + 0,0551 \cdot 1,4612 = \\ = 2,3179 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Тогда их полная энтальпия: $6,3011 \cdot 2,3179 \cdot 1700 = 24829,0$ кВт.

Сумма полных энтальпий: $42719,2 + 29935,9 + 24829,0 = 97484,1$ кВт.

При этом тепло частично излучается через горловину конвертера сечением $10,664$ м². Это тепло можно определить в соответствии с [152], как:

$$Q = S_{\text{г}} \cdot C_0 \cdot (T/100)^4, \quad (3.8)$$

$$Q = 10,664 \cdot 5,67 \cdot (1973/100)^4 \cdot 10^{-3} = 9162,4 \text{ кВт}.$$

Для процесса факельного торкретирования также характерны затраты тепла на размягчение огнеупорного материала и дополнительный нагрев футеровки, что в целом снижает температуру газовой среды в конвертере до 1600 °С. С учетом данных таблицы 3.5 рассчитали значения коэффициента излучения $C_{\text{пр}}$ (см. таблицу 3.6).

Среднее значение коэффициента излучения $C_{\text{пр}} = 3,8420$ Вт/(м²·К⁴) отличается от расчетных значений в таблице не более чем на 1%.

Таблица 3.6 – Коэффициент излучения системы газ – футеровка – фурма

Наименование	Обозначение	Значение			
Конечная температура азота, °С	$t_{Nк}$	0	100	200	300
Коэффициент, влияющий на степень черноты газа, кПа·м	$P_{CO_2} \cdot l_{эф}$	84,25	94,80	103,38	110,66
Степень черноты газа, ед.	ε_T	0,131	0,137	0,142	0,145
Коэффициент излучения, Вт/(м ² ·К ⁴)	$C_{пр}$	3,7978	3,8332	3,8604	3,8766

Далее ввели обозначения: Q_L – лучистый тепловой поток от футеровки и газовой среды к наружной поверхности фурмы с температурой t_ϕ ; Q_K – конвективный тепловой поток от газовой среды к той же фурме; $Q_{ФВ}$ – тепловой поток излучением от наружной трубы фурмы к ее внутренней трубе с температурой t_b ; $Q_{ФН}$ – конвективный тепловой поток от наружной трубы к потоку азота; Q_{NB} – конвективный тепловой поток от азота к внутренней трубе.

Схема тепловых потоков представлена на рисунке 3.5. В соответствии с рисунком 3.5: Q_N – тепловой поток на нагрев азота; t_{NH} – начальная температура азота; $t_{Nк}$ – конечная температура азота; t_ϕ и t_b – средняя по длине температура наружной и внутренней труб фурмы, соответственно.

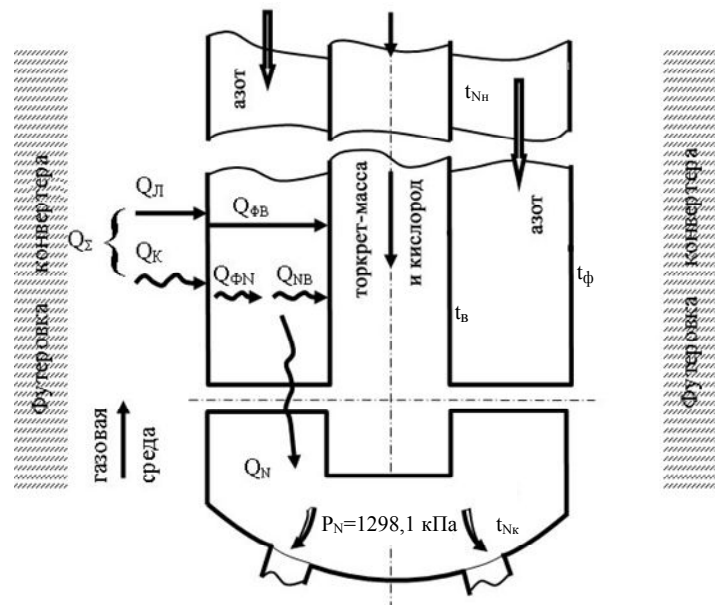


Рисунок 3.6 – Схема теплообмена для условий эксплуатации газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы [153]

Тепловые потоки определяли следующим образом [152]:

$$\text{- лучистые} \quad Q_L = C_{\text{пр}} \cdot F_{\phi} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.9)$$

$$\text{- конвективные} \quad Q_K = \alpha \cdot F_{\phi} (t_1 - t_2) \quad (3.10)$$

где: F_{ϕ} – площадь поверхности фурмы; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией; $t_1(T_1)$ – температура источника тепла; $t_2(T_2)$ – температура теплоприемника.

Правильность принятого значения температуры t_{ϕ} можно проверить равенством:

$$Q_L + Q_K = Q_{\text{ФВ}} + Q_{\text{ФН}}, \quad (3.11)$$

а правильность значения $t_{\text{НК}}$ – условием $Q_N = V_N (t_{\text{НК}} \cdot C_K - t_{\text{НН}} \cdot C_H)$, в котором V_N – расход азота при нормальных условиях, а C_K и C_H – его теплоемкость. При температуре газовой смеси в конвертере 1600 °С и начальной температуре азота 20°С, принимаем температуру наружной трубы фурмы 670 °С и конечную температуру азота 155 °С.

При средней плотности азота перед соплами Лавалья 10,21 кг/м³ расход азота составит 21,17 кг/с или 16,9358 нм³/с.

Тогда расход газовой смеси $V_{\text{СО}} = 16,9358 + 6,3011 = 23,2369$ нм³/с.

Газовая смесь, поднимаясь вверх, проходит через свободные сечения цилиндрической части и горловины конвертера. Поэтому средняя по высоте скорость газовой смеси при $t_r = 1600$ °С (1873 К) и $P = 98,1$ кПа.

$$W_{\text{гс}} = \frac{23,2369}{2} \left(\frac{1}{10,664} + \frac{1}{31,074} \right) \cdot \frac{1873 \cdot 101,325}{98,1 \cdot 273} = 10,37 \text{ м/с}$$

здесь 101,325 – нормальное давление, кПа; 273 – нормальная температура, К.

Определяющий размер обтекаемой газами фурмы $l_{\text{оп}} = \pi \cdot d_{\text{н}}/2 = 3,14 \times 0,325/2 = 0,51025$ м; кинематическая вязкость газовой смеси при 1600 °С $\nu_{\text{гс}} = 300 \cdot 10^{-6}$ м²/с; число Прандтля $Pr = 0,534$. Тогда число Рейнольдса:

$$Re_{\text{гс}} = \frac{W_{\text{гс}} \cdot l_{\text{оп}}}{\nu_{\text{гс}}}, \quad Re_{\text{гс}} = \frac{10,37 \cdot 0,51025}{300 \cdot 10^{-6}} = 17637,6. \quad (3.12)$$

Число Нуссельта в ламинарной области течения [152]:

$$Nu_L = 0,664 \sqrt{Re_c \cdot \sqrt[3]{Pr}}, \quad Nu_L = 0,664 \sqrt{17637,6 \cdot \sqrt[3]{0,534}} = 71,54, \quad (3.13)$$

а в турбулентной области:

$$Nu_T = \frac{0,037 \cdot Re_{гс}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_{гс}^{-0,1} \cdot (Re_{гс}^{2/3} - 1)}, Nu_T = \frac{0,037 \cdot 17637,6^{0,8} \cdot 0,534}{1 + 2,443 \cdot 17637,6^{-0,1} \cdot (0,534^{2/3} - 1)} = 71,88 \quad (3.14)$$

Общее число Нуссельта с учетом продольного обтекания фурмы газовой смесью при поправке 0,5 [152]:

$$Nu_{гс} = 0,5(0,3 + \sqrt{Nu_L^2 + Nu_T^2}), Nu_c = 0,5(0,3 + \sqrt{71,54^2 + 71,88^2}) = 50,88 \quad (3.15)$$

При теплопроводности газовой смеси $\lambda_{гс} = 162 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К) коэффициент теплоотдачи конвекцией от газовой смеси к наружной трубе торкрет-фурмы:

$$\alpha_K = \frac{Nu_{гс} \cdot \lambda_{гс}}{l_{оп}}, \alpha_K = \frac{50,86 \cdot 162 \cdot 10^{-2}}{0,51025} = 16,15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (3.16)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением от газовой смеси и футеровки к наружной трубе фурмы:

$$\alpha_L = \frac{q_L}{\Delta t} = C_{пр} \left[\left(\frac{T_{гс}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ф}}{100} \right)^4 \right] / (t_{гс} - t_{ф}), \quad (3.17)$$

$$\alpha_L = 3,842(18,73^4 - 12,33^4) / (1600 - 670) = 600,05 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\Sigma} = 16,15 + 600,05 = 616,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Тепловоспринимающая площадь поверхности фурмы $F_{ф} = 8,96 \text{ м}^2$, поэтому суммарный тепловой поток на поверхность наружной трубы фурмы:

$$Q_{\Sigma} = Q_L + Q_K, Q_{\Sigma} = 616,2 \cdot 8,96(1600 - 670) \cdot 10^{-3} = 3533,5 \text{ кВт}. \quad (3.18)$$

Средняя по длине фурмы температура азота:

$$t_N = 0,5 (t_{Nк} + t_{Nн}), t_N = 0,5 (155 + 20) = 87,5^\circ \text{C} (360,5 \text{ К}). \quad (3.19)$$

При этой температуре и давлении $P_N = 1298,1 \text{ кПа}$ плотность азота:

$$\gamma_N = 1298100 / 296,93 \cdot 360,5 = 12,1269 \text{ кг/м}^3.$$

Массовый расход азота при $t_{Nк} = 155^\circ \text{C}$ равен 21,5342 кг/с, а его объемный расход при $t_N = 87,5^\circ \text{C}$:

$$V_{Nф} = 21,5342 / 12,1269 = 1,7757 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость азота в кольцевом канале с площадью поперечного сечения $S_K = 0,0738 \text{ м}^2$.

$$W_N = V_{Nф} / S_K, W_N = \frac{1,7757}{0,0738} = 24,07. \quad (3.20)$$

Определяющий размер кольцевого канала:

$$l_{\text{оп}} = d_{\text{ф}} - d_{\text{в}}, \quad l_{\text{оп}} = 0,325 - 0,108 = 0,217 \text{ м.} \quad (3.21)$$

При температура азота $87,5^{\circ}\text{C}$ его теплопроводность $\lambda_{\text{N}} = 29,725 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К, число Прандтля $\text{Pr}_{\text{N}} = 0,706$, а динамическая вязкость азота при $87,5^{\circ}\text{C}$ $\mu_{\text{N}} = 20,3625 \cdot 10^{-6}$ Па·с; кинематическая вязкость при этой температуре:

$$\nu_{\text{N}} = 20,3625 \cdot 10^{-6} / 12,1269 = 1,6791 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Рейнольдса в кольцевом канале:

$$\text{Re}_{\text{N}} = \frac{24,07 \cdot 0,217}{1,6791 \cdot 10^{-6}} = 3110708,1.$$

Отношение диаметров:

$$d_{\text{ф}}/d_{\text{в}} = 0,325/0,108 = 3,0093.$$

Число Нуссельта в кольцевом канале [152]:

$$\text{Nu}_{\text{N}} = 0,017 \cdot \text{Re}_{\text{N}}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot (\text{Pr}/\text{Pr}')^{0,25} \cdot (d_{\text{ф}}/d_{\text{в}})^{0,18} \quad (3.22)$$

$$\text{Nu}_{\text{N}} = 0,017 \cdot 3110708,1^{0,8} \cdot 0,706^{0,4} \cdot (0,706/0,710)^{0,25} \cdot 3,0093^{0,18} = 2816,88;$$

коэффициент теплоотдачи конвекций от наружной трубы к азоту:

$$\alpha_{\text{фN}} = \frac{\text{Nu}_{\text{N}} \cdot \lambda_{\text{N}}}{l_{\text{оп}}}, \quad \alpha_{\text{фN}} = \frac{2816,88 \cdot 29,725 \cdot 10^{-3}}{0,217} = 385,86 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (3.23)$$

Тепловой поток от поверхности наружной трубы $F_{\text{ф}} = 8,96 \text{ м}^2$ к азоту:

$$Q_{\text{фN}} = \alpha_{\text{фN}} F_{\text{ф}} (t_{\text{ф}} - t_{\text{N}}), \quad Q_{\text{фN}} = 385,86 \cdot 8,96 (650 - 87,5) \cdot 10^{-3} = 3241,8 \text{ кВт}. \quad (3.24)$$

Азот, как двухатомный газ, по отношению к тепловому излучению лучепрозрачен, потому излучение наружной трубы, не изменяясь, доходит до поверхности внутренней трубы фурмы. Приведенный коэффициент излучения с поверхности наружной трубы на поверхность внутренней при степени черноты обеих труб $\varepsilon_{\text{ф}} = \varepsilon_{\text{в}} = 0,8$:

$$C_{\text{ФВ}} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\text{в}} \cdot \varepsilon_{\text{ф}}}{\varepsilon_{\text{ф}} + \varphi_{\text{ФВ}} \cdot \varepsilon_{\text{в}} (1 - \varepsilon_{\text{ф}})}, \quad (3.25)$$

а угловой коэффициент измерения с наружной трубы на внутреннюю:

$$\varphi_{\text{ФВ}} = d_{\text{в}}/d_{\text{ф}} = 0,108/0,325 = 0,3323. \quad (3.26)$$

Тогда:

$$C_{\text{ФВ}} = \frac{5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,8}{0,8 + 0,3323 \cdot 0,8 (1 - 0,8)} = 4,253 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4), \quad (3.27)$$

а тепловой поток излучением от наружной трубы к внутренней при площади поверхности внутренней трубы

$$F_B = \pi \cdot d \cdot H = 3,14 \cdot 0,108 \cdot 8,78 = 2,9774 \text{ м}^2 \quad (3.28)$$

и температуре ее 20°C:

$$Q_{\Phi B} = 4,253 \cdot 2,9774(12,33^4 - 2,93^4) \cdot 10^{-3} = 291,7 \text{ кВт.} \quad (3.29)$$

Суммарный тепловой поток от наружной трубы фурмы составит:

$$Q_{\Sigma \Phi} = Q_{\Phi N} + Q_{\Phi B} = 3241,8 + 291,7 = 3533,5 \text{ кВт.}$$

Тепловой поток от азота к внутренней трубе за счет конвекции:

$$Q_{NB} = \alpha_{\Phi N} F_B (t_N - t_B) = 385,86 \cdot 2,9774 \cdot (87,5 - 20) \cdot 10^{-3} = 77,6 \text{ кВт.} \quad (3.30)$$

Суммарный тепловой поток на внутреннюю трубу $Q_{\Phi B} + Q_{NB} = 291,70 + 77,6 = 369,3 \text{ кВт.}$ Таким образом до внутренней трубы доходит примерно лишь десятая часть теплового потока, получаемого наружной трубой (Q_{Σ}). Это тепло будет расходоваться на нагрев торкрет-массы и кислорода. При массовом расходе торкрет-массы 14,5833 кг/с (875 кг/мин) и объемном расходовании кислорода 4,1667 м³/с (250 м³/мин) суммарный тепловой поток:

$$369,25 = (4,1667 \cdot C_{O_2} + 14,5833 \cdot C_{TM}) \cdot t_c, \text{ кДж/с.} \quad (3.31)$$

При температуре 20 °C теплоемкость кислорода $C_{O_2} = 1,3082 \text{ кДж/ м}^3 \cdot \text{К}$), а теплоемкость торкрет-массы, как смеси из 75% огнеупорного порошка и 25% кокса, равна 0,8136 кДж/(кг·К). Тогда температура смеси из торкрет-массы и кислорода:

$$t_c = \frac{369,25}{4,1667 \cdot 1,3082 + 14,5833 \cdot 0,8136} = 21,3^\circ \text{C.}$$

Тепловой поток на нагрев азота составляет:

$$Q_N = Q_{\Phi N} - Q_{NB} = 3241,8 - 77,6 = 2164,2 \text{ кВт.} \quad (3.32)$$

Азот нагревается до температуры t_{NK} , поэтому должно быть справедливым равенство

$$Q_N = V_N(i_{NK} - i_{NH}). \quad (3.33)$$

Результаты численного исследования тепловой работы газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы представлены в таблице 3.7. При этом установлена возможность снижения теплопередачи на внутренние элементы специальных

дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертера до 10 % от воспринимаемого фурмой теплового потока, остальное тепло расходуется на нагрев азота, подаваемого для раздувки шлака.

Конечная энтальпия азота $i_{N_k} = i_{N_h} + Q_N / V_N$.

Начальная энтальпия азота при его температуре 20°C:

$$i_{N_h} = 1,29486 \cdot 20 = 25,9 \text{ кДж/нм}^3,$$

тогда

$$i_{N_k} = 25,9 + 2938,95/17,227 = 196,5 \text{ кДж/нм}^3.$$

При температуре 100 °С энтальпия азота равна $1,2959 \cdot 100 = 129,59$ кДж/нм³, а при температуре 200 °С, соответственно: $1,2959 \cdot 200 = 259,92$ кДж/нм³.

Таким образом:

$$(200 - t_{N_k}) = \frac{(200 - 100) \cdot 1,2959}{(259,92 - 129,59)} = 48,66^\circ\text{C}$$

$$\text{и } t_{N_k} = 200 - 48,66 = 151,34^\circ\text{C}.$$

Таблица 3.7 – Результаты численного исследования тепловой работы газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

Параметр	Величина	
	кВт	%
Тепловой поток конвекцией	92,6	2,6
Тепловой поток излучением	3440,9	97,4
Суммарный тепловой поток на нагрев фурмы	3533,5	100
Тепловой поток от наружной трубы к азоту	3241,8	
Тепловой поток от азота к внутренней трубе	77,6	
Тепловой поток излучением через кольцевой канал	291,7	
Тепловой поток на нагрев азота	3164,2	89,5
Суммарный тепловой поток на внутреннюю трубу	369,3	10,5
Температура внешней трубы фурмы, °С	672	
Температура азота, перед соплами Лавалья, °С	151	
Температура внутренней трубы фурмы, °С	21	
Максимальная температура внешней трубы, °С	730	

При принятой предварительно $t_{N_k} = 155^\circ\text{C}$ погрешность составит ~2,36%.

Для определения максимальной температуры поверхности наружной трубы фурмы $t_{ф.маx}$ использовали методику расчета металлического рекуператора промышленной печи [154]. Согласно этой методике:

$$t_{ф.маx} = t_{Nк} + (t_{гс} - t_{Nк}) / (1 + \alpha_{Ncp} / \alpha_{\Sigma}), \quad (3.34)$$

где $t_{гс}$ – температура газовой среды в рабочем пространстве конвертера; α_{Ncp} , α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемой (в трубе) и нагревающей (газ в рабочем пространстве) среды соответственно, Вт/(м²·К).

Расчеты показали, что при наиболее теплонпряженном процессе торкретирования максимальная температура нагрева наружной трубы торкрет-фурмы составляет 700 – 750 °С. Однако средняя температура по высоте будет составлять 670 – 675 °С, что надежно обеспечивает при эксплуатации ее стойкость. Азот перед соплами Лавалья будет иметь температуру около 150 °С, при этом основной его нагрев происходит после выхода из сопел, когда к струе примешиваются окружающие газы.

3.3 Проектирование и расчет характеристик охлаждения и теплообмена газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы

Теплообмен при использовании газопорошковой газоохлаждаемой фурмы (рисунок 3.3) имеет некоторые особенности. В случае использования конструкции торкрет-гарнисажной фурмы (рисунок 3.2) источником тепла в агрегате является разогретая газовая среда. При эксплуатации газопорошковой фурмы (рисунок 3.3), работа которой не предусматривает подачу и сжигание кокса, источником тепла служит только разогретая футеровка и расплавленный шлак.

В данном случае по составу газовая среда отличается отсутствием продуктов горения кокса и учет ее запыленности при расчете теплообмена также практически невозможен. Газовая фаза состоит из азота, который, как двухатомный газ, является лучепрозрачной средой. При этом отсутствие учета теплового потока излучением от газа на поверхность наружной трубы фурмы (увеличивающего температуру последней) «компенсируется» отсутствием учета

запыленности газовой среды. В реальных условиях запыленность газа приводит к ослаблению теплового излучения, направленного от поверхности футеровки и шлакового расплава, что также приводит к уменьшению температуры наружной трубы фурмы.

Газовая среда внутри конвертера после выпуска металла нагревается за счет тепла футеровки и расплавленного шлака. При нахождении конвертера в вертикальном положении под действием высоких температур внутри рабочего пространства и за счет тяги в газоотводящей системе расположенного над конвертером котла-утилизатора происходит возникновение мощных конвективных потоков газа, уносимых из конвертера. Поскольку рабочее пространство конвертера сообщается с окружающей средой, то в него происходит подсос холодного воздуха, что, естественно, приводит к охлаждению футеровки и шлака. Поэтому в данном случае можно считать, что температура газовой среды в конвертере равна температуре кладки (футеровки) и шлака и составляет 1500°C .

В данном варианте конструкции гарнисажной фурмы (рисунок 3.3) подача огнеупорного порошка в конвертер производится через головку фурмы вместе с потоком основного азота, подаваемого для раздувки расплавленного шлака. При этом для транспортировки огнеупорного порошка используется дополнительный объем транспортирующего азота.

Учитывая, что возможности магистрали азота позволяют обеспечивать суммарный расход азота при нормальных условиях не более $1200 \text{ нм}^3/\text{мин}$, расход транспортирующего азота $V_{\text{НТ}}$ находится как разность между общим расходом азота и пропускной способностью сопел Лавалья фурмы по основному азоту $V_{\text{Н}}$:

$$V_{\text{НТ}} = 1200 - V_{\text{Н}}. \quad (3.35)$$

В соответствии с техническими ограничениями расход огнеупорного порошка $\varphi_{\text{п}}$, вдуваемого в конвертер через фурму, составляет $350 - 600 \text{ кг/мин}$, а транспортирующего его азота $V_{\text{НТ}}$ – в пределах $150 - 250 \text{ нм}^3/\text{мин}$. Для максимальной производительности соотношение расходов огнеупорного порошка и азота должно составлять 2,4. Таким образом, расход огнеупорного порошка можно определить как:

$$\varphi_{\Pi} = 2,4 \cdot V_{Nt} \quad (3.36)$$

Особенностью конструкции газопорошковой фурмы является то, что коаксиально расположенные друг относительно друга азотное и газопорошковое сопла образуют кольцевой зазор, который формирует сверхзвуковую азотную струю (рисунок 3.3). Параметры сопел представлены на рисунке 3.6.

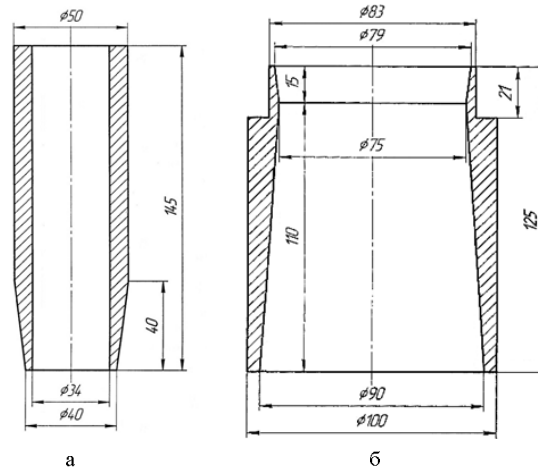


Рисунок 3.6 – Газопорошковое (а) и азотное (б) сопла

При определении геометрических параметров системы излучения «конвертер-фурма» дополнительно определяли только те геометрические параметры, которые отличаются от размеров в разделе 3.2 и необходимы для расчета теплообмена (рисунок 3.7).

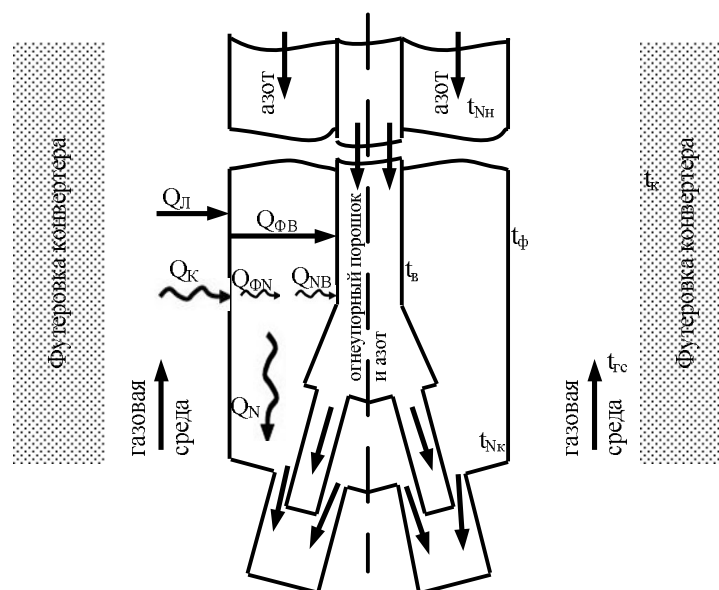


Рисунок 3.7 – Схема теплообмена для условий газоохлаждаемой газопорошковой фурмы

В собранном состоянии головки верхняя (входная) кромка азотного сопла располагается напротив перехода цилиндрической части газопорошкового сопла в коническую. На рисунке 3.8 показана схема проходного сечения сопла Лаваля фурмы, необходимая для расчета его критического сечения, выполненная с соблюдением существующих соотношений по размерам.

Как видно (рисунок 3.8) коническая поверхность газопорошкового сопла образует меньший (внутренний) периметр проходного сечения кольцевого зазора. А внутренняя часть азотного сопла, имеющая перегиб, образует больший (внешний) периметр проходного сечения зазора.

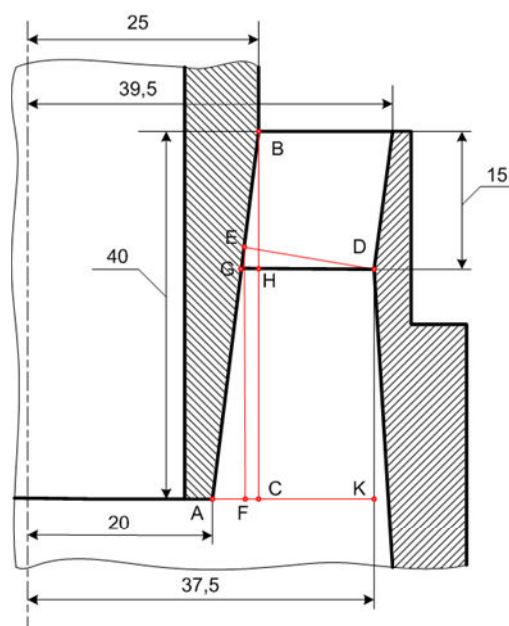


Рисунок 3.8– Схема для расчета критического сечения сопла Лаваля.

Сопло Лаваля для подачи в конвертер основного азота образуется кольцевым зазором переменного по ходу потока сечения между азотным и газопорошковым соплами (соответственно позиции 1 и 3 на рисунке 3.3), расположенными коаксиально друг к другу.

В таблице 3.8 представлены основные результаты расчета геометрической системы. При этом внешние размеры фурмы газопорошковой гарнисажной фурмы, внутренние размеры рабочего пространства конвертера, начальный уровень зеркала шлакового расплава, высота фурмы соответствуют данным, приведенным в разделе 3.2.

Таблица 3.8 – Результаты расчета характеристик системы конвертер-
дутьевое устройство

№ п/п	Параметр	Обозначение	Величина
1	Площадь свободного сечения горловины, м ²	S _Г	10,66
2	Площадь свободного сечения цилиндрической части конвертера, м ²	S _Ц	31,07
3	Площадь поверхности футеровки верхнего конуса конвертера, м ²	F _{ВК}	60,89
4	Объем верхнего конуса конвертера, м ³	V _{ВК}	73,33
5	Площадь цилиндрической части футеровки, м ²	F _Ц	72,28
6	Объем цилиндрической части конвертера, м ³	V _Ц	113,85
7	Площадь поверхности футеровки нижнего конуса конвертера, м ²	F _{НК}	37,15
8	Объем нижнего конуса конвертера, м ³	V _{НК}	53,08
9	Площадь зеркала шлаковой ванны, м ²	F _Ш	23,82
10	Объем, занятый газами в конвертере, м ³	V _Г	239,53
11	Площадь поверхности, ограничивающей объем газа, м ²	F _{ог}	213,76
12	Площадь внутренней поверхности футеровки конвертера, м ²	F _{вн}	204,74
13	Отношение площадей фурмы и футеровки конвертера	Φ _{фк}	0,044
14	Эффективная длина луча, м	l _{эф}	4,03
15	Площадь критического сечения сопла Лавала, м ²	S _с	0,0027
16	Площадь сечения кольцевого канала в фурме, м ²	S _к	0,07042
17	Определяющий размер кольцевого канала, м	l _к	0,233
18	Площадь поверхности внутренней трубы фурмы, м ²	F _в	2,10
19	Отношение площадей внешней и внутренней труб фурмы	Φ _{фв}	0,23

Результаты расчета характеристик газовой среды представлены в таблице 3.9.

Приведенный коэффициент излучения C_{пр} в рабочем пространстве агрегата для случая диатермичной газовой среды можно вычислить по выражению [152]:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_k \cdot \varepsilon_{\text{ф}}}{\varepsilon_k + \varepsilon_{\text{ф}} \cdot \Phi_{\text{фф}} (1 - \varepsilon_k)}, \quad (3.37)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_k и ε_f – степень черноты поверхности кладки конвертера и наружной трубы фурмы, соответственно; φ_{ff} – угловой коэффициент излучения от футеровки на фурму, ед.

$$C_{пр} = \frac{5,77 \cdot 0,8 \cdot 0,8}{0,8 + 0,8 \cdot 0,0437 \cdot 0,8} = 4,576 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Таблица 3.9 – Результаты расчета характеристик газовой среды при использовании газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы

Наименование	Обозначение	Значение
Плотность азота перед соплами Лаваля, кг/м ³	γ_N	8,80
Массовый расход азота, кг/с	ϕ_N	23,45
Объемный расход основного азота при выходе из фурмы, м ³ /мин	V_N	1125,71
Объемный расход транспортирующего азота при выходе из фурмы, м ³ /мин	$V_{Nт}$	74,29
Массовый расход огнеупорного порошка, кг/мин	$\phi_{п}$	178,29
Объемный расход газовой среды (азота), м ³ /мин	$V_N + V_{Nт}$	1200
Объемный расход газовой среды, м ³ /с	$V_{гс}$	20

В рассматриваемой системе приведенный коэффициент $C_{пр}$, значение которого не зависит от конечной температуры нагрева основного потока азота $t_{Nк}$ при прохождении его через фурму, сохраняется постоянным.

Тепловые потоки внутри фурмы и температурные нагрузки на конструктивные элементы газоохлаждаемой газопорошковой фурмы оценивали по методике, разработанной в разделе 3.2. Результаты расчета характеристик представлены в таблице 3.10.

Результаты расчета характеристик теплообмена показали, что при нанесении огнеупорного покрытия на футеровку агрегата с использованием газопорошковой гарнисажной фурмы более 90 % тепла, воспринимаемого наружной трубой дутьевого устройства расходуется на нагрев азота, проходящего через соответствующие сечения, что приводит к повышению его температуры до 150 – 160 °С. При этом другие конструктивные элементы фурмы получают менее 10 % теплового потока и нагреваются незначительно.

Таблица 3.10 – Результаты расчетов характеристик теплообмена

Параметр	Величина	
	кВт	%
Тепловой поток конвекцией	52,3	1,5
Тепловой поток излучением	3337,2	98,5
Суммарный тепловой поток на нагрев фурмы	3389,5	100
Тепловой поток от наружной трубы к азоту	3229,4	
Тепловой поток от азота к внутренней трубе	61,1	
Тепловой поток излучением через кольцевой канал	160,1	
Тепловой поток на нагрев азота	3168,3	93,5
Суммарный тепловой поток на внутреннюю трубу	221,2	6,5
Температура внешней трубы фурмы, °C	613	
Температура азота, перед соплами Лавалья, °C	159	
Температура внутренней трубы фурмы, °C	35	
Максимальная температура внешней трубы, °C	632	

Полученные в расчете значения средней ($t_{ф.ср} = 613 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и максимальной ($t_{ф.макс} = 632 \text{ }^{\circ}\text{C}$) температур наружной трубы фурмы несколько выше, чем фактические значения температуры ствола газоохлаждаемой гарнисажной фурмы при ее опробовании авторами работы [120], однако не превышают температурный порог (около $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$), при котором изделия из рядовых марок стали становятся пластичными. Кратковременность операции ремонта, отсутствие в агрегате жидкого металла позволяет считать, что фурма будет сохранять конструктивную прочность.

Таким образом, подтверждена принципиальная возможность охлаждения газопорошковой фурмы азотом, подаваемым на раздувку шлака, что обеспечивает простоту ее конструкции и высокую технологичность применения последней.

Выводы

1) Проанализированы современные разработки и направления совершенствования конструкций специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Определены основные технические решения по обеспечению повышенной стойкости агрегатов.

2) Показана принципиальная возможность расчета температурных нагрузок на конструктивные элементы специальных газоохлаждаемых дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Разработана методика анализа теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера и выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств.

3) С использованием разработанной методики выполнены расчеты и установлена возможность снижения теплопередачи на внутренние элементы газоохлаждаемых торкрет-гарнисажной и газопорошковой фурм до 10 % от воспринимаемого специальными дутьевыми устройствами теплового потока. Выданы практические рекомендации для условий 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

4 Исследование и совершенствование технологии продувки металла и нанесения огнеупорных покрытий с использованием высокомагнезиальных флюсов для условий эксплуатации большегрузных конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

4.1 Исходные условия и методика проведения промышленных исследований

В соответствии с развиваемыми положениями в промышленных условиях на 350-т конвертерах ККЦ №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» были проведены исследования технологических особенностей продувки конвертерной ванны и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата при использовании высокомагнезиальных флюсов. В период проведения исследований технология выплавки стали характеризовалась следующими параметрами: вес металлозавалки (чугун и металлический лом) составлял 320 – 350 т, в том числе расход чугуна 810 – 860 кг/т. Химический состав последнего колебался в пределах: Si – 0,35-0,65 %; Mn – 0,35-0,60 %; S – не более 0,028 %; P – не более 0,17 %. Температура заливаемого чугуна при этом не ниже 1380 °С.

Продувка металла кислородом в 350-т конвертерах ведется через 4-х сопловую фурму (сопла Лаваля критического диаметра 0,054 м расположены под углом 15° к вертикали). Для продувки плавки используется кислород чистотой 99,5% и под давлением 1,4 МПа с содержанием азота не более 0,1%. Продувка осуществляется по ступенчатому режиму: в начале и конце продувки металла расход кислорода составляет 900 – 1200 м²/мин; а в середине продувки – 700 – 1000 м³/мин. В течение первых 2-3 мин продувка ведется при положении фурмы 3,0 – 4,0 м по Сельсину, после чего фурма плавно опускается до 0,8 – 1,3 м. Общая продолжительность продувки составляет 18 – 22 мин.

Формирование шлака осуществляется за счет присадки извести, содержащей не менее 88,5 % CaO и 7 – 8 % потерь при прокаливании,

алюминиевой выбойки с содержанием 50 % C, 35 % CaF_2 , 12 % Al_2O_3 и высокомагнезиального флюса ФОМИ с содержанием не менее 66 % MgO .

Перед заливкой чугуна, как правило, проводят предварительный подогрев металлического лома в конвертере. В качестве основных теплоносителей используются различные марки углей Кузнецкого бассейна (до 15 кг/т), а также отработанные автомобильные покрышки (до 5 кг/т). Кислород на сжигание угля подается с расходом 200 – 400 м³/мин. Продолжительность нагрева составляет не менее 6 мин,

Известь отдается на лом до его нагрева в количестве до 80% от требуемого на плавку, остальная часть извести присаживается по ходу продувки порциями, либо равномерно с весов-дозаторов из промежуточных бункеров. Присадку высокомагнезиального флюса в конвертер выполняют обычно вместе с известью. Количество присаживаемых материалов рассчитывается в зависимости от химического состава и расхода чугуна, марки выплавляемой стали для получения жидкоподвижного, однородного конечного шлака с основностью не менее 2,5. Расходные коэффициенты на материалы колеблются в пределах: для извести – 50 – 55 кг/т; алюминиевой выбойки – 3 – 5 кг/т; высокомагнезиального флюса – 13 – 15 кг/т.

Рекомендуемая температура металла перед выпуском составляет не более 1650 °С. Додувки на температуру и углерод производятся при обычном, а на фосфор, серу и шлак – при повышенном на 0,5 м положении фурмы. Расход кислорода при этом поддерживается на уровне 600 м³/мин

Для защиты футеровки конвертера, рабочий слой которой выполняется периклазоуглеродистым огнеупорным кирпичом, а арматурный – периклазовым, после каждой плавки наносится шлаковый гарнисаж. Нанесение последнего совместно с проведением других видов горячих ремонтов, в частности подварок, факельного и полусухого торкретирования позволяет обеспечить стойкость футеровки до 5000 плавок, при расходе конвертерных огнеупоров 4 кг/т стали.

Для подготовки шлака к его раздувке на футеровку используется известь, высокомагнезиальный флюс ФМ-1 и уголь. При этом расход последних

определяется окисленностью шлака.

Раздувка подготовленного шлакового расплава осуществляется с использованием специальных дутьевых устройств или штатной кислородной фурмы. При выполнении операции нанесения шлакового гарнисажа фурма опускается ниже 1,0 м по Сельсину, расход азота составляет 700 – 1300 м³/мин при его давлении 1,0 – 1,4 МПа. В результате поверхность футеровки покрывается слоем шлака. Длительность периода нанесения гарнисажа, как правило, составляет 4-5 минут и определяется моментом исчезновения выноса брызг через горловину конвертера.

Все опытные плавки, выполненные под непосредственным контролем исследователей, осуществляли по режиму, характерному для условий работы цеха в соответствии с технологической инструкцией. При проведении опытных плавки контролировали режим продувки и присадки сыпучих материалов, внешний характер продувки (выбросы, выносы), заметалливание фурмы и горловины конвертера.

В качестве основных источников получения информации о ходе шлакообразования использовали замер температуры и отбор проб металла и шлака в конце продувки и после завершения раздувки шлака с последующим их анализом. Дополнительно провели серию опытных плавки с промежуточными повалками в характерные периоды операции. На некоторых плавках с промежуточными повалками для сравнения присадку высокомагнезиального флюса не производили.

Отобранные пробы конвертерных магнезиальных шлаков анализировали как исследовательский материал по известным методикам: НДИ МХ-0164-99 «Шлак. Определение массовой доли железа общего. Титриметрический метод»; НДИ МХ-0112-98 «Шлак. Определение массовой доли оксида алюминия»; НДИ МХ-0212-99 «Шлак. Определение массовой доли оксида кальция и оксида магния»; НДУ МКХА «Шлак. Определение массовой доли закиси марганца»; НДИ МХ-0133-98 «Шлак. Определение массовой доли диоксида кремния. Гравиметрический метод»; НДИ МХ-0217-99 «Шлак. Определение массовой доли

фосфора. Фотометрический метод», ГОСТ 23581.3-79 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Метод определения двухвалентного железа в пересчете на закись», ГОСТ 23581.20-81 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы определения серы».

Определение температуры плавления отобранных проб шлака выполняли по стандартной методике на микропечи [155]. Плавление шлака проводили в атмосфере воздуха. За температуру начала плавления принимали температуру, при которой происходит скругление острых кромок частиц шлака, а конец плавления фиксировали по полному переходу шлака в жидкое состояние и растекание на пластинке. Начинали определение температуры плавления с первого шлака, как наиболее легкоплавкого. Каждый шлак расплавляли не менее 5 раз с последующим определением среднеарифметического.

Рентгенофазовый анализ шлака проводили на дифрактометре ДРОН-2.0. Исследование проводили при следующих параметрах прибора: Fe-K_α-излучение; U_а=26 кВ; J_а=30 мА; N=400 имп/сек; RC=5 сек; окно=10; порог=10; V_{сч}=2 °/мин; V_{диаг}= 600 мм/час; Щ₁=1,0; Щ₂=2,0; Щ_{сч}=1,0*12; Щели Соллера – 1,5°.

Пробы для макроскопических текстурных исследований изучали в натуральном виде на стереомикроскопах МБС-2 и ЛабоСтеми-4 зум, сопровождая макроскопические исследования макросъемкой на цифровую фотокамеру OLYMPUS E 420. Минералографические исследования проводили в поляризованном отраженном свете на исследовательском металлографическом микроскопе МИМ-8-М, МИМ-10 и микроскопе поляризационном рабочем проходящего и отраженного света с цифровой камерой OLYMPUS E 420 ЛабоПол-2 РПО вариант 2 [156].

Отобранные пробы шлака для минералографических исследований цементировали эпоксидной смолой в брикеты диаметром 20 мм и подвергали мокрой шлифовке, доводке на алмазных брусках и алмазной пасте, полировке с использованием окиси хрома. Минералографические исследования проводили в широком диапазоне увеличений. При больших увеличениях (500 – 3000 ×)

использовали кедровое масло в качестве иммерсионной жидкости. Исследования проводили, как в обычном, так и в поляризованном свете.

Термографические исследования проводили на приборе для термического анализа фирмы Setaram при скорости изменения температуры – 10 °С/мин, температуре нагрева – 1500 °С в атмосфере воздуха.

4.2 Исследование физико-химических параметров шлаков конвертерной плавки с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ

С целью определения особенностей влияния присадок флюса на параметры шлакообразования были проведены плавки с дополнительными повалками при выплавке низко- и среднеуглеродистых марок стали.

Первую промежуточную повалку конвертера для отбора проб металла, шлака и замера температуры ванны выполняли, как правило, на 4-5 минуте продувки после растворения основного количества извести и формирования активного первичного шлака, с содержанием 25-35 % FeO и основностью 0,8-1,8. Следующую повалку агрегата выполняли в период интенсивного обезуглероживания на 11-12 минуте продувки при максимальной скорости окисления углерода [156].

Анализ отобранных проб позволил создать общую картину процесса шлакообразования и охарактеризовать его особенности. В таблице 4.1 приведен химический состав шлаков наиболее характерных опытных плавов с дополнительными промежуточными повалками конвертера, при этом представлены плавки №№ 521146, 520919, которые проведены с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ, а на плавках №№ 520948, 520994 присадку флюса для сравнения не производили. На плавке № 521146 отобрана четвертая проба шлака после завершения операции раздувки расплава на футеровку агрегата.

На рисунке 4.1 (а) видно, что шлакообразование при проведении плавки №521146 начиналось медленно, на что указывает низкая скорость прироста

концентрации СаО на первой повалке, и в целом, в течение продувки, следует отметить, что содержание оксида кальция меньше обычного его содержания в конвертерном шлаке.

По изменению концентрации MgO в шлаке можно судить о достаточно быстром растворении флюса в начале продувки: уже на первой повалке содержание MgO составляло 8,95 %. Заметно, что во 2-ой половине продувки MgO нарастает медленнее, чем в первой: на второй повалке содержание – 11,58 %, а в конце продувки – 11,19 %. Это может быть связано с тем, что большая часть флюса уже была растворена, так и с ухудшением условий растворения магнезии, а также с увеличением общего количества шлака.

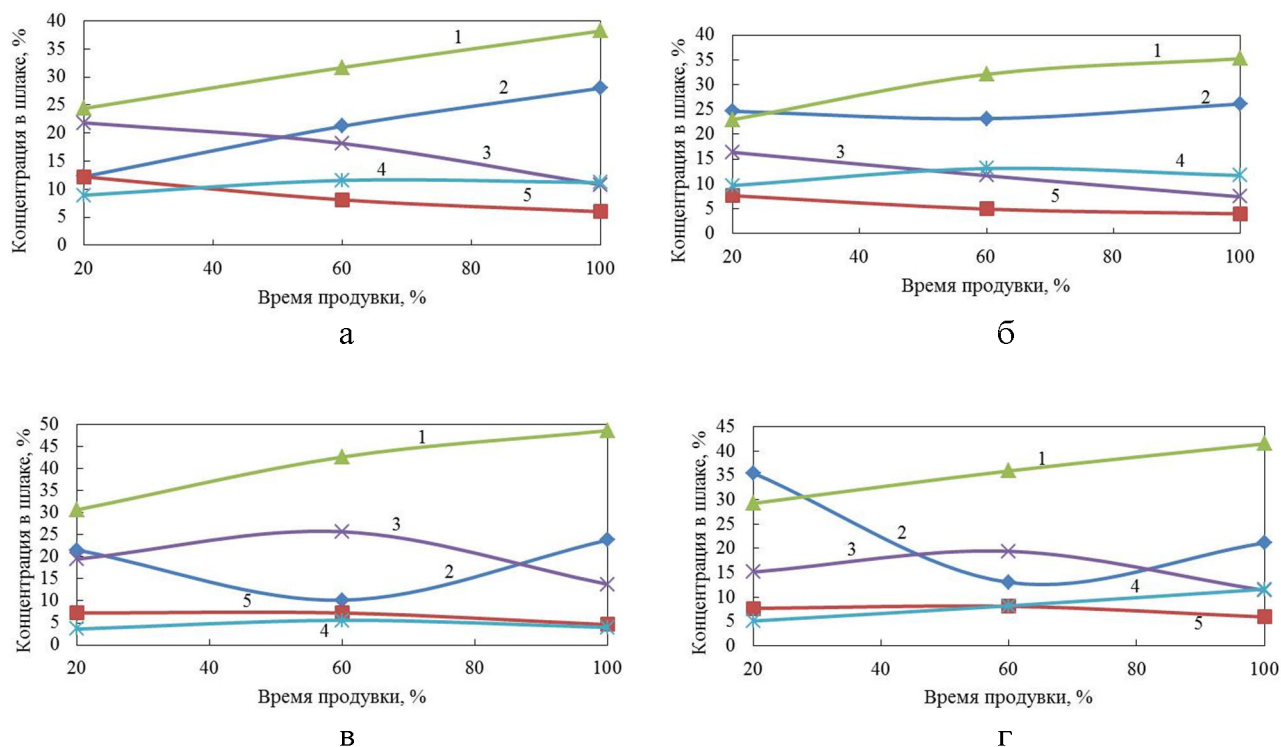
Таблица 4.1 – Химический состав проб шлака

Номер плавки	Номер Пробы	Содержание, %								
		CaO	MgO	FeO _x	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	S	Fe _{мет}
521146	1-1	24,41	8,95	12,26	12,23	21,84	2,35	2,88	0,059	20,4
	1-2	31,7	11,58	21,24	8,12	18,18	1,63	3,68	0,064	7,46
	1-3	38,21	11,19	28,02	6,0	10,81	1,39	2,48	0,104	1,17
	1-4	41,24	18,3	21,75	4,54	8,55	1,03	2,07	0,064	2,45
520919	2-1	22,96	9,69	24,64	7,65	16,37	1,8	3,56	0,08	12,24
	2-2	32,09	13,12	23,15	4,94	11,67	1,33	2,98	0,078	10,96
	2-3	35,23	11,7	36,11	3,98	7,42	1,03	2,14	0,125	1,75
520948	3-1	30,67	3,61	21,55	7,25	19,47	1,44	4,05	0,073	16,44
	3-2	42,65	5,60	10,17	7,25	25,70	0,78	4,05	0,07	2,22
	3-3	48,64	3,99	23,78	4,62	13,78	1,56	2,64	0,082	2,22
520994	4-1	29,26	5,06	35,50	7,65	15,12	1,74	3,49	0,07	2,56
	4-2	35,93	8,18	13,00	8,08	19,4	1,68	4,02	0,059	7,34
	4-3	41,51	11,59	21,13	5,89	11,35	1,71	2,64	0,1	3,15

Характерным является тот факт, что на плавке № 521146 с применением ФОМИ окисленность шлака непрерывно увеличивается до окончания периода продувки. В середине операции, в период интенсивного обезуглероживания, окисленность шлака более 20 % обеспечивало его жидкоподвижность.

Повышенное содержание MnO в начале операции, объясняется высоким содержанием Mn в чугунах (0,65 %). В дальнейшем содержание MnO в шлаке

снижается до обычных характерных для процесса значений и определяется в основном температурой и окисленностью шлакового расплава.



1 – CaO, 2 – FeO_x, 3 – SiO₂, 4 – MgO, 5 – MnO

а – плавка № 521146, б – плавка № 520919, в – плавка № 520948,

г – плавка № 520994

Рисунок 4.1 – Изменение состава шлака на опытных плавках по ходу продувки

По изменению концентрации SiO₂ в шлаке можно косвенно оценивать увеличение общего количества последнего. Как известно [140] основным источником поступления кремнезема в шлак является содержащийся в чугуне кремний, а окисление кремния, как правило, практически полностью заканчивается на первых минутах продувки. Приведенные данные свидетельствуют об обеспечении спокойного хода продувки и равномерном в течение всей продувки увеличении массы шлака, что обусловлено растворением присаживаемых шлакообразующих материалов, в том числе высокомагнезиального флюса ФОМИ. Отработанный шлаковый режим позволил предотвратить возникновение неорганизованных выбросов шлакометаллической

эмульсии и сворачивание шлака в отдельные периоды операции продувки конвертерной ванны.

Установленные основные закономерности шлакообразования, зафиксированные в описанной характерной плавке, сохраняются и на плавке № 520919 (см. рисунок 4.1 б): увеличение содержания MgO в первой половине продувки вследствие присадок флюса ФОМИ, замедленное растворение извести при повышенной окисленности шлака. Следует отметить также, что к концу продувки концентрация MgO в шлаке снижается, что, видимо, обусловлено, увеличением общего количества шлака и, следовательно, снижением объемной концентрации оксида в расплаве.

Изменение состава шлака в течение продувки на плавке № 520948 без присадки флюса ФОМИ показало, что шлакообразование протекало достаточно энергично: уже на первой повалке концентрация оксида кальция достигла 30 % (см. рисунок 4.1, в). Это можно объяснить повышенным расходом извести. В шлаке содержится невысокое количество магнезии, которое, скорее способствует разжижению шлака, чем его загущению.

Основным источником поступления MgO на этой плавке является шлаковый гарнисаж. Заметно увеличение содержания MgO в шлаке в течение продувки металла. Основное количество магнезии поступило в шлак в первой половине продувки, в результате размыва гарнисажного покрытия железистым шлаком. На заключительном этапе продувки содержание MgO в шлаке, несмотря на его высокую окисленность, снизилось за счет увеличения количества шлака.

Описанные закономерности наблюдали и на плавке № 520994, но она имеет ряд особенностей. В шлаке, отобранном на второй повалке, фиксируется повышенное содержание FeO (см. рисунок 4.1, г). Это способствовало поступлению в шлак большего количества MgO .

Раннему формированию активного основного шлака в рассматриваемых условиях способствуют температурные параметры ванны и жидкоподвижность расплава. В конвертерной ванне в каждый выделенный период продувки температура металла и шлака изменяется в достаточно узких пределах, поэтому

нагрев шлака выше температуры плавления определяет его жидкоподвижность и формирует динамику растворения извести, флюса ФОМИ и, в целом, условия массопереноса. Для оценки физико-химических характеристик отобранных шлаков выполнили измерение их температуры плавления. Результаты представлены в таблице 4.2.

Температура плавления шлака при использовании высокомагнезиального флюса изменяется от 1290 °С до 1410 °С. На плавках без присадки флюса ФОМИ температура плавления несколько ниже, причем шлаки конца продувки, несмотря на их повышенную окисленность, имеют достаточно высокую температуру плавления [157].

Таблица 4.2 – Температура плавления шлака опытных плавов [157]

Номер плавки	Номер пробы	Температура плавления шлака, °С	Номер плавки	Номер пробы	Температура плавления шлака, °С
521146	1-1	1246-1281	520948	3-1	1220-1258
	1-2	1321-1373		3-2	1287-1321
	1-3	1396-1424		3-3	1378-1420
	1-4	1401-1434			
520919	2-1	1288-1344	520994	4-1	1283-1321
	2-2	1382-1420		4-2	1355-1401
	2-3	1403-1436		4-3	1385-1417

Что касается влияния содержания MgO на температуру плавления шлака, то, несомненно, повышение содержания MgO в шлаке более 8 – 10 % сопровождается увеличением его тугоплавкости и, соответственно, вязкости, а значит, соответствующим снижением жидкоподвижности и активности.

4.3 Исследование фазово-минералогических параметров конвертерных магнезиальных шлаков

В соответствии с отмеченными закономерностями изменения химического состава шлака по ходу продувки конвертерной ванны с использованием

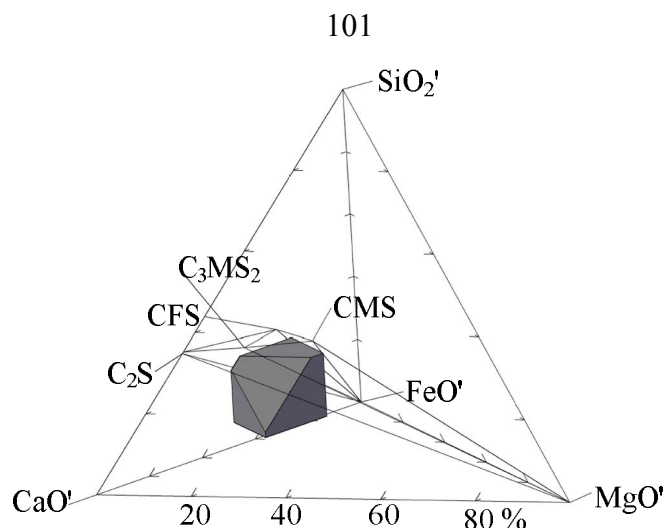
высокомagneзиального флюса ФОМИ выполнен анализ фазовых превращений при растворении оксида магния. Фазовые превращения в шлаке по ходу продувки конвертерной ванны рассматривали на основе четырехкомпонентной оксидной системы $\text{CaO}'\text{-MgO}'\text{-FeO}'\text{-SiO}_2'$, где CaO' и MgO' – содержание соответствующих оксидов в системе. В свою очередь, FeO' представляли, как $\text{FeO}_x\text{+MnO}$, а SiO_2' , как $\text{SiO}_2\text{+P}_2\text{O}_5$ (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Характеристики оксидных систем

Номер плавки	Номер пробы	Содержание, %			
		CaO'	MgO'	FeO_x'	SiO_2'
521146	1-1	30	11	30	29
	1-2	34	13	32	21
	1-3	40	12	35	13
	1-4	43	19	28	10
520919	2-1	27	12	39	22
	2-2	37	15	33	15
	2-3	41	14	35	10
520948	3-1	37	4	34	25
	3-2	46	6	19	29
	3-3	51	4	29	16
520994	4-1	31	5	46	18
	4-2	42	10	24	24
	4-3	45	12	29	14

Для определения соотношения равновесных фаз анализировали изменение характеристик рассматриваемых групп оксидных систем на диаграмме состояния $\text{CaO}'\text{-MgO}'\text{-FeO}'\text{-SiO}_2'$ (рисунок 4.2).

Установлено, что шлаки начала продувки, содержащие большое количество SiO_2 , как правило, кристаллизуются с образованием различных силикатов, вюститита и незначительного количества периклаза. В шлаках середины продувки возрастает содержание периклаза. В заключительный период продувки магнезиальные шлаки кристаллизуются с образованием двухкальциевого силиката – $(\text{CaO})_2\cdot\text{SiO}_2$, содержащего 65 % CaO и 35 % SiO_2 , извести и твердого раствора магнезиовюститита.



$CFS - CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$; $C_3MS_2 - (CaO)_3 \cdot MgO \cdot (SiO_2)_2$; $CMS - CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$;
 $C_2S - (CaO)_2 \cdot SiO_2$

Рисунок 4.2 – Фазовый состав конвертерных магнезиальных шлаков

Количество извести в шлаке зависит от его основности (CaO/SiO_2), а количество магнезиовюстита – от основности и содержания MgO и FeO в шлаке (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Фазовый состав шлака

Номер плавки	Номер пробы	Содержание в шлаке, мол. %						
		C_2S	C_3MS_2	CMS	CFS	CaO	MgO	FeO
							в магнезиовюстите	
521146	1-1	–	13,99	40,56	31,67	–	–	13,78
	1-2	26,66	35,51	–	–	–	12,14	25,69
	1-3	37,24	–	–	–	16,83	16,97	28,95
	1-4	27,90	–	–	–	24,29	26,48	21,34
520919	2-1	–	45,80	18,92	–	–	3,21	32,06
	2-2	43,13	–	–	–	9,27	21,62	25,98
	2-3	28,55	–	–	–	23,47	19,64	28,33
520948	3-1	23,67	38,79	–	12,90	–	–	24,63
	3-2	37,70	45,85	–	–	–	1,14	15,32
	3-3	47,37	–	–	–	22,06	6,12	24,45
520994	4-1	39,58	15,49	–	–	–	5,63	39,29
	4-2	46,14	24,60	–	–	–	9,53	19,71
	4-3	40,23	–	–	–	18,84	17,74	23,19

При возрастании количества магнезии в шлаке увеличивается содержание мервинита – $(\text{CaO})_3 \cdot \text{MgO} \cdot (\text{SiO}_2)_2$ и монтчеллита – $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, имеющих следующий химический состав: 63 % и 36 % CaO, 15,00 % и 26 % MgO, 22 % и 38 % SiO_2 , соответственно. При увеличении окисленности шлака возрастает содержание кирштайнита – $\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (30 % CaO, 38 % FeO, 32 % SiO_2).

Присадка высокомагнезиального флюса при подготовке шлака к раздувке, в соответствии с расчетным соотношением равновесных фаз, сопровождается увеличением содержания извести и магнезиовюстита при уменьшении содержания двухкальциевого силиката. При этом происходит изменение состава магнезиовюстита: увеличивается содержание тугоплавкой составляющей – периклаза и уменьшается содержание легкоплавкой составляющей – вюстита.

По ходу продувки конвертерной ванны, происходит перераспределение MgO между фазами шлака: в начале продувки MgO в закристаллизовавшихся шлаках преимущественно находится в составе силикатов, а в конце продувки – в виде периклаза магнезиовюстита (таблица 4.5). Таким образом распределение MgO между фазами шлака зависит от содержания магнезии в шлаке и величины основности шлака.

Таблица 4.5 – Распределение MgO между фазами шлака

Номер плавки	Номер пробы	Количество MgO в фазах шлака, %	
		Силикаты	Магнезиовюстит
521146	1-1	100	–
	1-2	32,79	67,21
	1-3	–	100
	1-4	–	100
520919	2-1	81,30	18,70
	2-2	–	100
	2-3	–	100
520948	3-1	100	–
	3-2	87,06	12,94
	3-3	–	100
520994	4-1	31,44	68,56
	4-2	30,06	69,94
	4-3	–	100

Известно, что для обеспечения высокой технологичности процесса формируемые шлаки должны находиться в области насыщения оксидом MgO или к ней приближаться [59, 68]. Для определения концентрации насыщения магнезиевюститом или оливином системы $\text{CaO-MgO-FeO}_x\text{-SiO}_2$ использовали диаграмму равновесия последней с железом при 1873 К, в проекции на тройную краевую диаграмму $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ (рисунок 4.3). Цифры у кривых показывают концентрацию насыщения (MgO_n), при достижении которой из расплава начинает выделяться твердая фаза, представленная магнезиевюститом или оливином.

Анализ насыщения MgO оксидных систем (таблица 4.4), формирующихся в течение продувки конвертерной ванны кислородом при проведении опытных плавов показал, что значительное влияние на концентрацию насыщения MgO оказывает величина основности шлака. Окисленность шлака не имеет принципиального значения, особенно при высокой основности расплава. Таким образом, скорость протекания процессов шлакообразования, в первую очередь растворения извести, имеет первостепенное значение для изменения концентрации насыщения конвертерных шлаков оксидом магния.

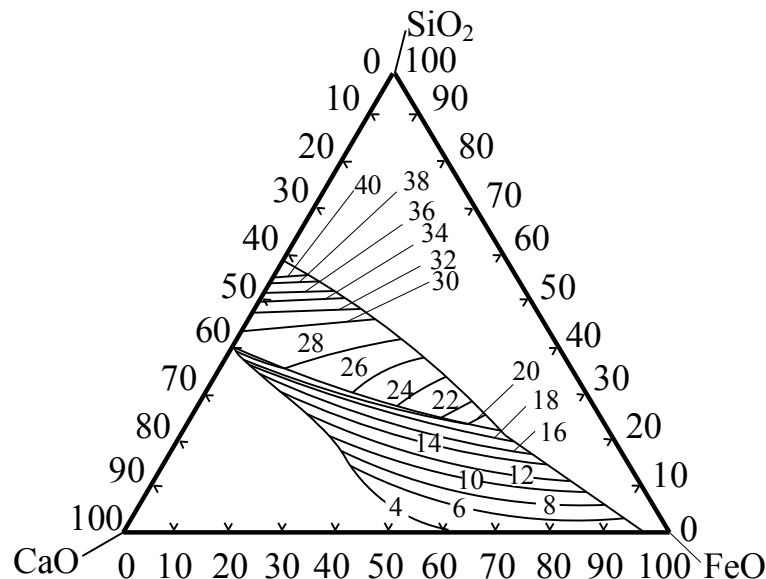


Рисунок 4.3 – Диаграмма состояния системы $\text{CaO-MgO-FeO}_x\text{-SiO}_2$, равновесной с железом, в проекции на тройную краевую диаграмму при температуре 1873 К

Для шлаков начала продувки характерна высокая концентрация насыщения MgO [158]. По мере развития процесса шлакообразования и снижения содержания

SiO_2 в шлаке концентрация насыщения MgO уменьшается к концу продувки до 6 – 7 %. При этом, уже в середине продувки обеспечивается формирование шлаков с концентрацией MgO , близкой к области насыщения, обладающих низким агрессивным воздействием на футеровку конвертера [159].

Необходимо отметить, что в начальный период продувки при повышенном содержании MgO наблюдается пониженная величина основности, в результате разница между фактическим содержанием магнезии и ее концентрацией насыщения не изменяется. Следовательно, наличие огнеупорного гарнисажного слоя в начале продувки конвертерной ванны является необходимым условием для защиты футеровки агрегата от разрушения.

В середине продувки конвертерной ванны концентрация MgO определяет разрушающее действие шлака на огнеупорную футеровку агрегата. При повышенном содержании оксида магния в расплаве, шлак находится вблизи области насыщения магнезией. При низком содержании MgO , шлак оказывает агрессивное воздействие на футеровку. В конце продувки содержание магнезии определяет степень пересыщения шлака MgO .

Теоретический анализ фазовых превращений в шлаке по ходу продувки конвертерной ванны показал, что оксидные системы, соответствующие шлакам начала продувки, содержащие большое количество SiO_2 , как правило, кристаллизуются с образованием силикатов, вюститита и незначительного количества периклаза. В оксидных системах, соответствующих шлакам середины продувки, возрастает содержание периклаза. «Шлаки» заключительного периода продувки кристаллизуются с образованием двухкальциевого силиката – $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$, извести и твердого раствора магнезиовюститита. При этом, происходит перераспределение MgO между фазами «шлака»: в начале продувки MgO преимущественно находится в составе силикатов, а в конце продувки – в виде периклаза магнезиовюститита. «Шлаки» начального периода продувки отличаются высокой концентрацией насыщения MgO (20 – 25 %) и, таким образом, соответствующие оксидные системы способны дополнительно растворить еще 8 – 14 % оксида магния. В середине продувки обеспечивается формирование шлаков

с концентрацией MgO близкой к области насыщения, а в конце продувки – в области пересыщения магнезиовюститом (до 9 %) [159].

Для уточнения установленных закономерностей изменения фазового состава шлака по ходу продувки конвертерной ванны выполнили минералографические исследования образцов отобранных шлаков наиболее характерной для рассматриваемых условий опытной плавки № 521146. Внешний вид отобранных проб шлака представлен на рисунке 4.4.

Текстура обломков шлака после завершения операции раздувки шлака на футеровку агрегата (рисунок 4.4 г) заметно отличается от шлаков, отобранных в течение продувки (рисунок 4.4 а, б, в). Во первых, они толще в 2 – 3, а иногда 4 раза; а, во вторых, представляют брекчию или нагромождение ошлакованных обломков тугоплавких частиц загущающего материала [160].



а – образец 1-1; б – образец 1-2; в – образец 1-3; г – образец 1-4

Рисунок 4.4 – Внешний вид образцов шлака опытной плавки № 521146

Эти тугоплавкие частицы обычно представлены периклазом, реже известью. Обломки периклаза, не успевшего прореагировать в шлаке, имеют широкую реакционную зону, состоящую из периклаза, извести и силикатов кальция. Ядро этих обломков не содержит шлаковых компонентов, но подвергнуто собирательной перекристаллизации с укрупнением обломков. Очевидно, микрокристаллические размеры индивидов периклаза внутри периклазовых обломков способствуют перекристаллизации с укрупнением индивидов, а на периферии обломков их растворению за счет взаимодействия с силикатными и прочими компонентами шлака [161, 162].

Вокруг непрореагировавших обломков периклаза и извести создаются переменные термодинамические условия. Растворение микроскопически мелких индивидов требует определенной энергии, вследствие чего, температура в данном микрообъеме понижается, а вязкость шлака увеличивается. В микрообъемах, где происходит кристаллизация с укрупнением индивидов, напротив, выделяется скрытая теплота кристаллизации, способствующая разогреву и разжижению шлака в данном микрообъеме. Описанные обломки периклаза представлены на рисунке 4.4 (г) в виде светлых пятен, на фоне темного шлака [163].

По данным химического анализа (таблица 4.1) и оптической микроскопии выполнен расчет изменения минерального состава конвертерного магнезиального шлака в процессе продувки ванны кислородом (таблица 4.6).

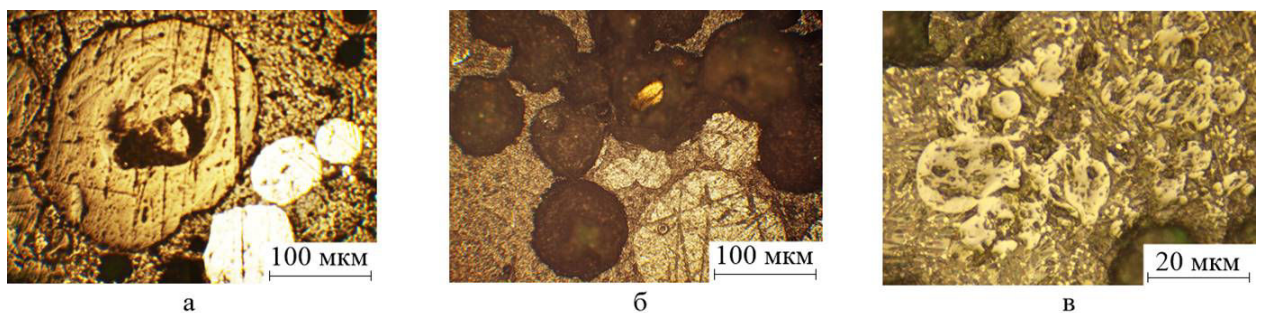
Таблица 4.6 – Минеральный состав образцов шлака плавки № 521146 [160]

Минерал	Химическое соединение	Т _{пл} , °С	Содержание минерала в образце, мол. %			
			1-1	1-2	1-3	1-4
Периклазиды						
Периклаз	MgO	2800	3,97	1,91	11,45	20,29
Известь	CaO	2570	1,2	14,44	25,05	34,04
Вюстит	FeO	1370	1,23	2,67	3,63	1,01
Манганозит	MnO	1850	2,94	2,51	3,49	2,61
Шпинелиды						
Шпинель	MgO·Al ₂ O ₃	2135	1,29	1,4	0,82	0,25
Галаксит	MnO·Al ₂ O ₃	1870	1,29	0,47	0,27	0,11
Герценит	FeO·Al ₂ O ₃	1750	1,29	0,47	0,27	0,44
Якобсит	MnO·Fe ₂ O ₃	1500	1,94	1,48	0,81	0,37
Магнезиоферрит	MgO·Fe ₂ O ₃	1810	0,65	3,69	2,73	2,39
Магнетит	Fe ₃ O ₄	1592	1,37	1,18	0,81	1,56
Маггемит	Fe ₂ O ₃		0,69	3,04	0,26	0,23
Оливины						
Двухкальциевый силикат	(CaO) ₂ ·SiO ₂	2130	29,79	26,49	22,64	8,56
Форстерит	(MgO) ₂ ·SiO ₂	1890	14,9	15,89	9,28	6,95
Фаялит	(FeO) ₂ ·SiO ₂	1205	7,45	5,89	2,91	4,55
Тефроит	(MnO) ₂ ·SiO ₂	1345	7,45	5,89	2,83	1,07
Витлокит	(CaO) ₃ ·P ₂ O ₅	1720	1,51	0,99	0,91	0,61
Пироксены						
Волластонит	CaO·SiO ₂	1540	-	0,39	-	2,85
Пироксен	(Mg,Fe,Mn,Ca) ₂ Si ₂ O ₆	1500	8,68	0,39	-	2,23
Ферриты кальция						
Браунмиллерит	(Ca,Mg) ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅	1415	-	9,36	6,21	5,23
Кальциоферрит	CaO·Fe ₂ O ₃	1400	10,81	-	5,24	4,41
Ольдгамит	CaS		0,25	0,26	0,45	0,25

В повалочных пробах шлака зафиксированы скопления крупных зерен периклазидов, состоящих из двух изоморфных рядов: периклаза и извести. Ниже представлены расчетные химические формулы периклазидов опытных образцов шлака, где коэффициент у каждого катиона показывает его содержание в долях единицы:

- 1) $(\text{Mg}_{0,42}\text{Mn}_{0,32}\text{Ca}_{0,13}\text{Fe}_{0,13})\text{O}$, при этом отмечены магнезиовюстит $(\text{Mg}_{0,78}\text{Fe}_{0,20}\text{Ca}_{0,01}\text{Mn}_{0,01})\text{O}$ и кальциоманганозит $(\text{Mn}_{0,58}\text{Ca}_{0,37}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}_{0,02})\text{O}$;
- 2) $(\text{Ca}_{0,67}\text{Fe}_{0,12}\text{Mn}_{0,12}\text{Mg}_{0,09})\text{O}$;
- 3) $(\text{Ca}_{0,57}\text{Mg}_{0,27}\text{Fe}_{0,08}\text{Mn}_{0,08})\text{O}$;
- 4) $(\text{Ca}_{0,59}\text{Mg}_{0,35}\text{Mn}_{0,04}\text{Fe}_{0,02})\text{O}$, при этом установлены магнезиовюстит $(\text{Mg}_{0,90}\text{Fe}_{0,07}\text{Ca}_{0,03})\text{O}$, а кальциоманганозит $(\text{Ca}_{0,87}\text{Mn}_{0,07}\text{Mg}_{0,04}\text{Fe}_{0,02})\text{O}$.

Выделение реликтового периклаза и извести наблюдали во всех опытных образцах (рисунок 4.5). Таким образом, конвертерный шлак в течение продувки имеет гетерогенный состав, где тугоплавкие частицы периклаза и извести находятся в расплаве, сформированном смесью более легкоплавких компонентов. В течение продувки содержание твердофазных включений увеличивается в результате кристаллизации тугоплавкого двухкальциевого силиката.



а – крупное зерно периклаза; б – зерна извести; в – магнезиовюстит переменного состава

Рисунок 4.5 – Микроструктура периклазидов, отраженный свет.

На рисунке 4.5 (а, б) зерна периклаза и извести сцементированы преимущественно криптокристаллическим агрегатом силикатов, что характерно

для шлаков, имеющих низкую основность. Яркие изометричные включения – корольки железа.

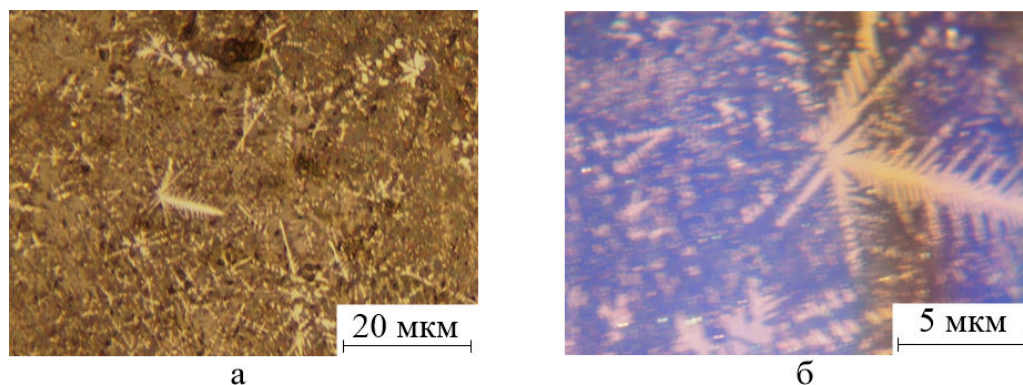
В течение продувки металла на этих реликтовых центрах происходит кристаллизация более легкоплавких минералов (рисунок 4.5 в). Вновь образованные слои магнезиовюстита, нарастая на зерна периклаза, обладают пониженной температурой кристаллизации за счет наличия в них изоморфных легкоплавких примесей и образуют концентрично-зональную структуру.

Внутренние, первые слои, обладающие более низкой отражательной способностью, представлены периклазом и включениями извести со сравнительно небольшим содержанием легкоплавкого вюстита. Внешняя зона периклазидов всегда обладает высоким отражением. По периферии скопления периклазовых зерен располагается типичная структура эвтектического прорастания скелетных кристаллов двухкальциевого силиката и кальциоферритов.

Шпинелиды при снижении температуры или увеличении содержания MgO и Al_2O_3 могут выкристаллизовываться из расплава и присутствовать в шлаке в твердом состоянии.

На рисунке 4.6 представлены скелетные кристаллы шпинелидов с изоморфной примесью магнезиовюстита. Скелетные кристаллы шпинелидов образуют шестилучевые пучки (рисунок 4.6 а). От их лучей направлены ветви второго порядка, на концах которых располагаются мелкие глобулярные субиндивиды, содержащие примеси магнезиовюстита (рисунок 4.6 б). Также шпинелиды образуют светлые окаемки вокруг кристаллов периклаза или извести, нарастая на последние вместе с магнезиовюститом.

Содержание оливинов в опытных образцах шлака последовательно уменьшается от 61,09 % до 21,73 %, при этом они имеют сложный переменный состав, обусловленный совершенным изоморфизмом оливиновых компонентов. Наиболее тугоплавкими составляющими являются двухкальциевый силикат, температура плавления которого составляет 2130 °С, и форстерит с температурой плавления 1890 °С, а наиболее легкоплавким – фаялит с температурой плавления 1205 °С.



а – образец шлака 1-2 с повышенным содержанием магнезии и глинозема, отраженный свет; б – скелетный кристалл шпинелидов, отраженный свет, иммерсия

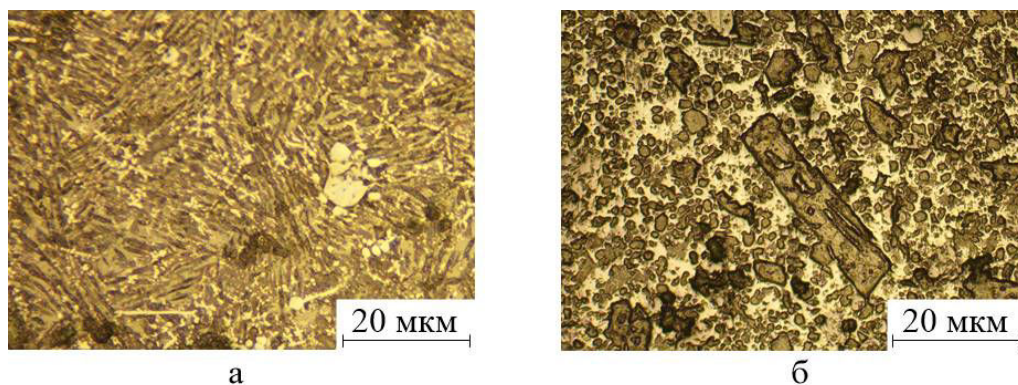
Рисунок 4.6 – Микроструктура шпинелидов

Двухкальциевый силикат имеет большое значение в процессе шлакообразования, так как является и тугоплавкой, и рафинирующей составляющей шлака: в нем неограниченно растворяется оксид фосфора с образованием силикофосфатов. Двухкальциевый силикат при температуре 1420 °С испытывает фазовый переход, сопровождающийся объемными изменениями, однако вхождение в кристаллическую решетку последнего ионов фосфора, магния или железа обеспечивает устойчивость высокотемпературной модификации и при более низких температурах.

Двухкальциевый силикат кристаллизуется в условиях сильного переохлаждения, что способствует образованию скелетных кристаллов. Последние представляют собой чередование параллельных рядов субиндивидов (рисунок 4.7 а). Пространство между ветвями и пластинами двухкальцевого силиката заполнено кристаллами шпинелидов и периклазидов. Только в заключительный период продувки и при раздувке шлака на футеровку конвертера образуются кристаллы правильной формы.

Установлено, что кристаллы двухкальцевого силиката растут в течение всего периода продувки металла, при этом количество их генераций соответствует числу присадок извести. Зарождение каждой новой генерации

минерала происходит в момент присадки очередной порции материала (рисунок 4.7 б).



а – скелетные кристаллы оливинов (образец шлака 1-2); б – агрегат кристаллов оливинов, сцементированных легкоплавкими компонентами шлака (образец шлака 1-3)

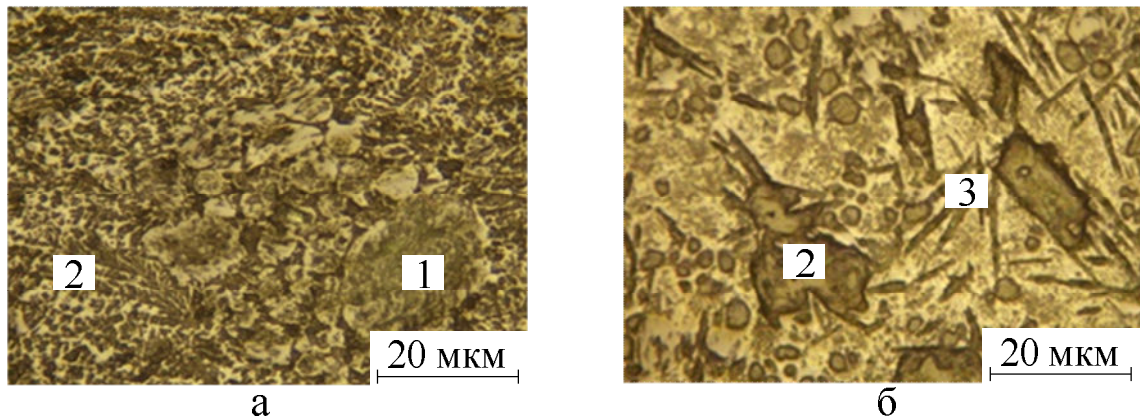
Рисунок 4.7 – Микроструктура оливинов, отраженный свет

Пироксены в шлаке находятся в расплавленном состоянии и кристаллизуются только при полном затвердевании шлака. В шлаке фиксировали диопсид $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot (\text{SiO}_2)_2$, содержащий изоморфную примесь Fe, Mn и Al, иногда встречали псевдоволластонит $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ в виде тонких игольчатых или пластинчатых кристаллов [164].

Выявленные ферриты кальция также относятся к наиболее легкоплавкой составляющей конвертерного шлака. Они представлены в основном двукальциевым ферритом $(\text{CaO})_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, содержащим изоморфные примеси разных компонентов. В отдельных микрообъемах фиксировали браунмиллерит $(\text{Ca}, \text{Mg})_2(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_5$. Содержание ферритов кальция в шлаке составляет около 10 %. Ферриты располагаются в интерстициях между хорошо закристаллизовавшимися тугоплавкими минералами. Следовательно, форма зерен ферритов кальция ксеноморфная, а распределение их в объеме шлака равномерное, в виде отдельных скоплений [160].

Необходимо отметить, что микроструктура шлака, отобранного после завершения операции его раздувки на футеровку агрегата (рисунок 4.8 б),

характеризуется значительно большим количеством крупных тугоплавких кристаллов оливинов и периклазидов.



1 – периклазиды; 2 – оливины; 3 – пироксены

Рисунок 4.8 – Микроструктура шлаков конца продувки (а) и после нанесения шлакового ганисажа (б)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для повышения эффективности технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера необходимо увеличение в шлаке количества крупных кристаллов двухкальциевого силиката. Для раннего формирования кристаллов последнего, необходимо ускоренное растворение извести в начале процесса, и только после ошлакования основного количества извести целесообразно присаживать высокомагнезиальный флюс, поддерживая повышенную окисленность шлака, чтобы ускорить процесс его растворения и не допустить перекристаллизацию периклаза.

В соответствии с развиваемыми положениями подготовку шлака к раздувке на футеровку агрегата обычно осуществляют путем введения на последний регламентированного количества высокомагнезиального флюса ФМ-1 (в среднем 2,9 кг/т стали), содержащего более 80 % MgO. Проведенные на первом этапе минералографические исследования показали (см. таблицу 4.7), что основными MgO-содержащими минералами флюса являются брусит ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), магнезит (MgCO_3) и доломит (Ca,MgCO_3). Силикаты представлены пироксеном и

полевым шпатом. Результаты рентгено-фазового анализа свидетельствуют также о наличии незначительного количества талька, коалинита и кварца.

Таблица 4.7 – Минеральный состав флюса магнезиального (ФМ-1)

Содержание компонентов, мол. %			
Брусит	Магнезит	Доломит	Силикаты
44,71	36,06	16,43	2,80

Для термогравиметрического анализа отобрали пробы шлака опытной плавки № 521146: проба 1 соответствует шлаку, отобранному по окончанию продувки перед выпуском металла из агрегата; проба 2 соответствует гарнисажному шлаку, отобранному после завершения операции раздувки расплава на футеровку агрегата. Масса первой навески шлака – 60 мг, а второй навески шлака – 60,5 мг. В процессе нагрева опытных образцов в шлаке протекают фазовые и структурные превращения, характерные для реальных условий процесса, что сопровождается изменением массы и энтальпии. Результаты анализа конечного конвертерного и гарнисажного шлаков представлены в таблице 4.8 и на рисунке 4.9.

Таблица 4.8 – Результаты термогравиметрического анализа шлака

№ п/п	Название	Проба 1				Проба 2			
		$\pm\Delta H$	Δm	t_n	t_k	$\pm\Delta H$	Δm	t_n	t_k
1	Адсорбция	-	+0,438	15	122	-	+0,875	15	74
2	Десорбция	+	-0,221	122	418	+	-1,081	74	474
3	Окисление до Fe_3O_4	-	+1,396	418	800	-	+1,4	474	1000
4	Окисление до Fe_2O_3	-	+0,443	1100	1309	-	+1	1160	1300
5	Плавление	+		1309	1500	+		1313	1500
6	Фазовый переход $(CaO)_2 \cdot SiO_2$	-		1348	1323	-		1400	1391
7	Кристаллизация эвтектики шлака	-	0	1200	1100	-	0	1200	1100

На дериватограмме изображены: кривая ДТА (дифференциальный термический анализ), отражающая изменение энтальпии (ΔH) в процессе нагрева и охлаждения навески пробы шлака; кривая Δm , отражающая изменение массы навески, и линия Т, изображающая режим нагрева и охлаждения печи.

В процессе нагрева в шлаке протекают различные физико-химические процессы, сопровождающиеся изменением массы ($\pm \Delta m$) и энтальпии: экзотермические ($-\Delta H$) и эндотермические ($+\Delta H$), разделяемые «ноль» кривой (0-0), проходящей от начала кривой ДТА (20 °С) до температуры окончания физико-химических процессов, фиксируемых на кривых Δm и ДТА.

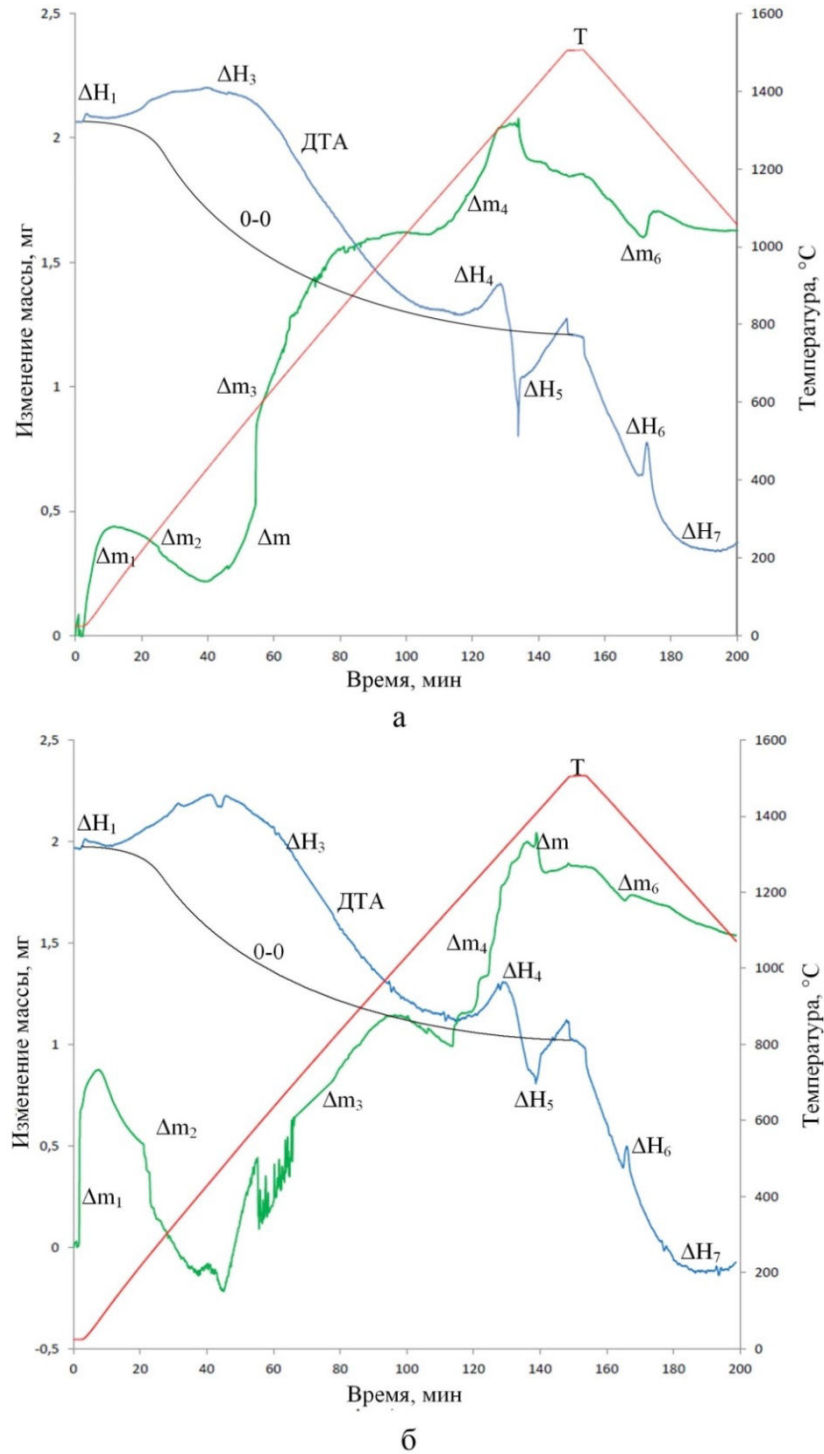
В начале нагревания на кривых изменения массы отмечаются эффекты (Δm_1 , Δm_2), обусловленные процессами адсорбции и десорбции газов шлаком, находящимся в мелкодисперсном состоянии.

Происходящее в дальнейшем увеличение массы навесок шлаков связано с протеканием экзотермических окислительных реакций, характеризующихся соответствующим изменением энтальпии (ΔH_3 и ΔH_4). При этом на кривой изменения массы отмечается перегиб в интервалах температур 800 – 1100 °С для конечного конвертерного шлака и 1000 – 1160 °С для гарнисажного шлака. В соответствии с химическим анализом в конечном конвертерном шлаке содержится 1,17 % корольков железа и 17,34 % FeO. Таким образом увеличение массы навески при окислении: корольков металла до FeO должно составлять 0,198 мг; FeO шлака и FeO от корольков железа до Fe₃O₄ – 0,792 мг; а Fe₃O₄ до Fe₂O₃ – 0,462 мг. Для гарнисажного шлака: 0,420 мг, 0,799 мг и 0,465 мг, соответственно. Сначала идет процесс окисления до Fe₃O₄ (Δm_3), в дальнейшем – до Fe₂O₃ (Δm_4). Различие в расчетных и полученных фактических данных (см. таблицу 4.8), видимо, связано с повышенным содержанием корольков железа и FeO в исследуемых навесках шлака.

Как видно из рисунка 4.9 проба 2 характеризуется повышенной температурой плавления шлака (эффект ΔH_5), по сравнению с пробой 1, что обусловлено увеличением количества и тугоплавкости магнезиевюстита и предполагает более высокую стойкость огнеупорного покрытия.

На кривых охлаждения шлаков зафиксированы экзотермические эффекты (ΔH_6) от полиморфного превращения двухкальциевого силиката, которые также отражаются и на кривых изменения массы (Δm_6), очевидно, за счет изменения объема и растрескивания частиц последнего. Шлак пробы 2 характеризуется

несколько большей температурой полиморфного превращения по сравнению с шлаком пробы 1. Последнее очевидно обусловлено наличием изоморфных примесей в кристаллической решетке двухкальцевого силиката в пробе 1. Уменьшение величины эффектов Δm_6 и ΔH_6 в шлаке 2 объясняется меньшей концентрацией двухкальцевого силиката, что связано с присадками флюса.



а – проба 1; б – проба 2

Рисунок 4.9 – Дериватограмма проб шлака опытной плавки № 521146.

Тепловой эффект при температурах 1200 – 1100 °С (ΔH_7) характеризует процесс окончательного затвердевания шлака. Наличие жидкой фазы при таких низких, для сталеплавильного процесса, температурах способствует раннему формированию основного шлака при заливке в агрегат жидкого чугуна, что благоприятно для процесса шлакообразования в конвертерной ванне.

Таким образом установленный характер фазовых и структурных превращений в процессе нагрева опытного образца гарнисажного шлака свидетельствует о формировании надежного огнеупорного покрытия на футеровке агрегата. Последнее обусловлено изменением состава твердого раствора магнезиовюстита, и соответствующим увеличением температуры плавления шлакового расплава, а также снижением содержания двухкальциевого силиката.

4.4 Результаты разработки и совершенствования технологии продувки конвертерной ванны с использованием флюса ФОМИ

С использованием результатов теоретического анализа фазовых превращений в шлаковом расплаве при растворении оксида магния и минералографических исследований, которые позволили уточнить изменение минерального состава и, соответственно, физико-химических характеристик и рафинирующей способности шлака в процессе продувки металла, а также термогравиметрического анализа конечного конвертерного и гарнисажного шлаков разработаны рекомендации по совершенствованию шлакового режима конвертерной операции с использованием высокомагнезиальных флюсов.

Применительно к условиям работы 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» рекомендовано на металлический лом перед его подогревом присаживать не более трети необходимого количества высокомагнезиального флюса, остальное количество флюса вводить не ранее 4 – 5 минуты продувки после растворения основного количества извести в железистом шлаке. После присадки флюса опустить фурму до уровня, на 30 – 50 % превышающего рабочий, для

поддержания необходимой окисленности шлака и только после 3 – 4 минут продувки переводить в рабочее положение.

Для оценки эффективности предлагаемых решений провели серию опытных плавов и проанализировали технологические показатели продувки металла. В таблице 4.9 приведены усредненные данные о количестве чугуна, лома и шлакообразующих материалов, температуре и химическом составе чугуна и металла, химическом составе шлака для опытных и сравнительных плавов, которые проведены в один и тот же период кампании по футеровке конвертеров в соответствии с разработанными рекомендациями и существующей в цехе технологической инструкцией.

Для большей достоверности технологических показателей в обработку были взяты данные по плавкам сопоставимого сортамента выплавляемых марок стали. Плавки с нарушениями технологии и исправлениями конвертерной операции (додувками), как правило, в анализе и обработке не использовали.

Необходимо отметить, что анализируемые опытные и сравнительные плавки проводились на одном конвертере при стойкости футеровки в интервале 1200 – 1700 плавов и характеризовались относительно узкими пределами колебаний входных параметров. Последнее позволило обеспечить близкий технологический режим продувки на опытных и сравнительных плавках и выявить влияние изменения шлакового режимов на показатели процесса. Опытные плавки проводили при меньшем на 7 кг/т стали удельном расходе чугуна и соответствующем увеличении на 0,5 кг/т расхода угля на подогрев лома для обеспечения замкнутого теплового баланса процесса выплавки стали.

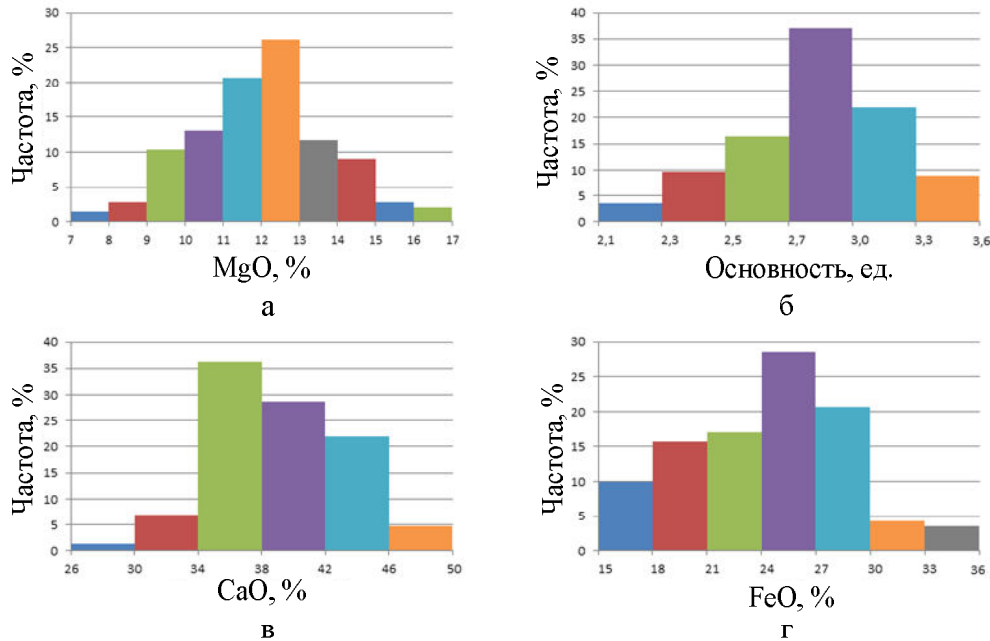
Некоторое уменьшение расхода высокомагнезимального флюса привело к снижению содержания оксида магния в шлаке на повалке конвертера до 12,05 %. Ускоренное растворение извести и, соответственно, шлакообразование позволило обеспечить благоприятные условия для протекания процессов десульфурации и дефосфорации. Реализация разработанной технологии характеризуется увеличением коэффициентов распределения фосфора и серы до 157 и 4,33 ед., соответственно.

Таблица 4.9 – Технологические показатели продувки металла в 350-т конвертерах с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ

Наименование показателя	Опытные плавки	Сравнительные плавки
Количество плавов	72	150
Расход металлома, кг/т	288	281
Расход чугуна, кг/т	812	819
Температура чугуна, °С	1400	1399
Химический состав чугуна, %		
Si	0,54	0,57
Mn	0,43	0,41
S	0,018	0,017
P	0,090	0,091
Присадки в конвертер, кг/т		
ФОМИ	16,9	17,7
Известь	52,3	51,2
Уголь	6,5	6,0
Алюминиевая выбойка	3,4	3,5
Температура на повалке, °С	1619	1622
Химический состав металла на повалке, %		
C	0,051	0,053
Mn	0,101	0,097
S	0,018	0,020
P	0,009	0,010
Химический состав шлака, %		
CaO	36,7	36,4
SiO ₂	12,4	11,7
FeO	25,8	27,2
MgO	12,05	12,3
MnO	4,41	4,2
P ₂ O ₅	1,41	1,46
S	0,078	0,085
Основность	2,96	3,11
Коэффициенты распределения:		
(S)/ [S]	4,33	4,25
(P ₂ O ₅)/[P]	157	146

Анализ основных характеристик шлака, формируемого при реализации опытной технологии ведения конвертерной плавки, показал, что при среднем расходе высокомагнезиального флюса 16,9 кг/т на 26% плавов была достигнута концентрация MgO 12 – 13 % (рисунок 4.10, а). Установлено, что 36 % плавов

заканчивается при содержании СаО в шлаке 34 – 38 % (рисунок 4.10, в). Основность 37% плавов находится в пределах 2,7 – 3,0 единиц (рисунок 4.10, б). Таким образом, формируемые конвертерные магнезиальные шлаки соответствуют рекомендациям по величине основности.



а – содержание MgO в шлаке; б – основность шлака; в – содержание СаО в шлаке;
г – содержание FeO в шлаке

Рисунок 4.10 – Основные характеристики шлаков опытных плавов

На рисунке 4.10, г показано, что на трети плавов формируемый шлак содержит порядка 24 – 27 % FeO. Рекомендуемый режим ввода флюса не требует увеличения окисленности шлака для протекания физико-химических процессов. При этом обеспечиваются условия для ускоренного шлакообразования, рафинирования металла от вредных примесей. В начале продувки происходит снижение концентрации насыщения шлака оксидом магния и уменьшение скорости диффузии катионов Mg^{2+} из футеровки.

В таблице 4.10 приведен расчет изменения затрат на производство стали с использованием высокомагнезиальных флюсов для опытных и сравнительных плавов в ценах 2016 года. Необходимо отметить, что расход огнеупоров на сравнительных плавках соответствует фактическим затратам на футеровку без

учета проведения «горячих» ремонтов (подварки, факельное и полусухое торкретирование) на кампании конвертера, в течение которой проводили опытно-промышленные исследования. Расход огнеупоров на опытных плавках скорректирован в соответствии с результатами выполненных замеров остаточной толщины футеровки при отработке шлакового режима процесса. Замеры осуществляли с помощью лазерной измерительной системы LaCam-M после каждой опытной плавки.

Цена огнеупоров соответствует усредненному значению для периклазоуглеродистых, периклазовых формованных огнеупоров, а также неформованных огнеупорных масс, используемых при холодном ремонте футеровки.

Таблица 4.10 – Изменение затрат на производство стали

Материал	Цена, руб/т	Расход на опытных плавках, кг/т	Расход на сравнительных плавках, кг/т	Изменение расхода, кг/т	Изменение затрат, руб/т
Чугун	9340,14	812,31	818,83	-6,52	-60,90
Металлолом	9953,67	287,88	281,21	6,67	66,39
Известь	2572,05	52,3	51,2	1,1	2,83
ФОМИ	6749,30	16,9	17,7	-0,8	-5,40
Уголь	3069,46	6,5	6,0	0,5	1,53
Выбойка	1608,13	3,4	3,5	-0,1	-0,16
Огнеупоры	91413,9	0,66	0,73	-0,07	-6,40
Итого					-2,10

В соответствии с расчетами удельный расход огнеупоров на опытных плавках составил 0,66 кг/т стали против 0,73 кг/т на сравнительных плавках, что позволит снизить затраты на огнеупоры на 6,4 руб/т. В целом, расчетное изменение затрат на производство стали составляет 2,1 руб/т. Прогнозируемый годовой экономический эффект в результате совершенствования технологии выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК», при производстве стали 4 млн. т. в год, составит 8,4 млн. руб.

Выводы

1) Выполнено опытно-промышленное исследование технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т агрегатов АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ. Установлено, что формируемые конвертерные шлаки содержат 11 – 13 % MgO , при этом ухудшаются условия шлакообразования: растворение извести протекает медленнее, содержание CaO в течение всей продувки на 5 – 10 % меньше обычных значений, наблюдается быстрое увеличение содержания MgO в шлаке при его повышенной окисленности.

2) Определены фазовые превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса с использованием диаграммы состояния четырехкомпонентной оксидной системы $CaO-MgO-FeO_x-SiO_2$. Экспериментально, минералографическими исследованиями, подтверждено изменение минерального состава, текстурно-структурных, кристаллохимических и кристаллофизических характеристик шлака по периодам продувки конвертерной ванны. Установлено перераспределение MgO между фазами шлака в зависимости от концентрации оксида магния и основности шлака. Выполнена оценка изменения концентрации насыщения шлакового расплава оксидом магния в различные периоды продувки металла.

3) Выполнено экспериментальное исследование фазовых и структурных превращений в шлаковом расплаве при присадке высокомагнезиального флюса ФМ-1 для подготовки к раздувке на футеровку конвертера. Установлено увеличение температуры плавления шлакового расплава, обусловленное изменением количества и состава твердого раствора магнезиовюстита, а также снижение содержания двухкальциевого силиката, что обеспечивает повышение стойкости огнеупорного покрытия на футеровке агрегата.

4) Определены рациональные параметры технологии с использованием высокомагнезиальных флюсов, позволяющей обеспечить рафинирование металла от вредных примесей, снижение окисленности шлака и формирование надежного

защитного покрытия. Проведены опытно-промышленные плавки, отработаны дутьевой и шлаковый режим ведения конвертерной операции. Переданы к промышленному внедрению рекомендации по совершенствованию технологии выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Прогнозируемый годовой экономический эффект составит 8,4 млн. руб.

Заключение

В процессе выполнения диссертационной работы, направленной на разработку новых ресурсосберегающих технологий продления срока службы футеровки кислородных конвертеров с применением высокомагнезиальных флюсов, получены следующие основные результаты:

1) Методами физического моделирования высокотемпературных процессов исследованы особенности взаимодействия газовых струй с жидкостью при реализации технологии раздувки шлака на футеровку конвертера. Установлен механизм и гидрогазодинамические режимы взаимодействия вихревой газовой струи со шлаковым расплавом.

2) Численными экспериментами установлено, что при реализации технологии нанесения защитного покрытия на футеровку конвертера с использованием вихревой раздувки шлакового расплава размер частиц, выносимых из зоны взаимодействия, определяется скоростью газового потока и расходом газа, при этом снижение вязкости расплава способствует уменьшению минимального размера частиц.

3) Проанализированы особенности движения капель шлака, образующихся при раздувке расплава вихревыми газовыми струями в кислородном конвертере. Установлена зависимость между параметрами движения брызг шлака различного диаметра и характеристиками вихревой струи. Определено оптимальное для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера соотношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, равное 0,2 – 1,0 отн. ед.

4) Установлено, что на параметры движения мелких капель шлака большое влияние оказывает аэродинамика транспортирующего газа, а поведение крупных капель шлака зависит от скорости газового потока только в начале движения, в дальнейшем его влияние становится незначительным. При этом траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется соотношением незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи.

5) Проанализированы современные разработки и направления совершенствования конструкций специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Определены основные технические решения по обеспечению повышенной стойкости агрегатов.

6) Показана принципиальная возможность расчета температурных нагрузок на конструктивные элементы специальных газоохлаждаемых дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Разработана методика анализа теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера и выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств.

7) С использованием разработанной методики выполнены расчеты и установлена возможность снижения теплопередачи на внутренние элементы газоохлаждаемых торкрет-гарнисажной и газопорошковой фурм до 10 % от воспринимаемого специальными дутьевыми устройствами теплового потока. Выданы практические рекомендации для условий 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

8) Выполнено опытно-промышленное исследование технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т агрегатов АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ. Установлено, что формируемые конвертерные шлаки содержат 11 – 13 % MgO , при этом ухудшаются условия шлакообразования: растворение извести протекает медленнее, содержание CaO в течение всей продувки на 5 – 10 % меньше обычных значений, наблюдается быстрое увеличение содержания MgO в шлаке при его повышенной окисленности.

9) Определены фазовые превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса с использованием диаграммы состояния четырехкомпонентной оксидной системы $CaO-MgO-FeO_x-SiO_2$. Экспериментально, минералографическими исследованиями, подтверждено изменение минерального состава, текстурно-структурных, кристаллохимических

и кристаллофизических характеристик шлака по периодам продувки конвертерной ванны. Установлено перераспределение MgO между фазами шлака в зависимости от концентрации оксида магния и основности шлака. Выполнена оценка изменения концентрации насыщения шлакового расплава оксидом магния в различные периоды продувки металла.

10) Выполнено экспериментальное исследование фазовых и структурных превращений в шлаковом расплаве при присадке высокомагнезиального флюса ФМ-1 для подготовки к раздувке на футеровку конвертера. Установлено увеличение температуры плавления шлакового расплава, обусловленное изменением количества и состава твердого раствора магнезиевостита, а также снижение содержания двухкальциевого силиката, что обеспечивает повышение стойкости огнеупорного покрытия на футеровке агрегата.

11) Определены рациональные параметры технологии с использованием высокомагнезиальных флюсов, позволяющей обеспечить рафинирование металла от вредных примесей, снижение окисленности шлака и формирование надежного защитного покрытия. Проведены опытно-промышленные плавки, отработан дутьевой и шлаковый режим ведения конвертерной операции. Переданы к промышленному внедрению рекомендации по совершенствованию технологии выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Прогнозируемый годовой экономический эффект составит 8,4 млн. руб.

Список литературы

1. Петракова, Т.М. Итоги работы предприятий черной металлургии России за 9 мес. 2015 г. / Т.М. Петракова, И.М. Иванова // Черная металлургия. 2016. № 1. С. 3 – 16.
2. Пантейков, С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров // Черная металлургия. – 2013. – №6. – С. 65 – 78.
3. Гуогуанг, Ж. Длительность кампании конвертера за счет всплеска шлака и эффективное использование технологии донной продувки ТВМ / Ж. Гуогуанг, Р. Хюскен, Ю. Капель // Черные металлы. – 2013. – № 4. – С. 29 – 39.
4. Mills, K.C. A review of slag splashing / K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox // ISIJ International. – 2005. – V. 45. – № 5. – P. 619 – 633.
5. Jiehua, L. The Refractories Industry--Worldwide and China / L. Jiehua, Z. Ningsheng // American Ceramic Society bulletin. – 2003. – V. 82. – №. 10. – P. 18 – 23.
6. Колпаков, С.В. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В.Колпаков, Р.В.Старов, В.В.Смоктий [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.
7. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и экология : [учеб.] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. - Днепропетровск: РВА «Дніпро – ВАЛ». - 2006. – 454 с.
8. Li, X.M. Progress and Status of BOF Protection Technology by Slag Splashing / X.M. Li, G.F. Wang, J. Yang // Foundry Technology. – 2007. – V. 28. – №. 8. – P. 1140 – 1144.
9. Баптизманский, В.И. Конвертерные процессы производства стали / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – Киев, Донецк: Вища школа, 1984. – 344 с.
10. Баптизманский, В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.

11. Старов, Р.В. Влияние технологических особенностей конвертерной плавки на износ футеровки / Р.В. Старов, Ю.М. Нечкин, В.И. Явойский // Производство стали в кислородно-конвертерных и мартеновских цехах. – М.: Металлургия, 1978. – С. 25 – 29.
12. Conghu, L. Maintenance of Converter Lining at the Middle and Later Periods of Service / L. Conghu, Z. Yong // *Anhui Metallurgy*. – 2009. – V. 3. – P. 15 – 22.
13. Дидковский, В. К. Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / В. К. Дидковский, Е. В. Третьяков; Ин-т «Черметинформация». - М. : 1985. – 23 с. (Обзор. информ. Сер. “Сталеплавильное производство”, вып. 4).
14. О растворимости окиси магния в кислородно-конвертерных шлаках / К.-Х. Обст, Э. Шюрман, Г. Ман [и др.] // *Черные металлы*. – 1980. - №20.
15. Бабенко, А.А. Теоретические и технологические решения повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров и современных ДСП / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, Л.Ю. Михайлова [и др.] // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья». – 2015. – С. 226 – 234.
16. Бабенко, А.А. Теоретические и технологические особенности выплавки железоуглеродистого расплава в кислородных конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, Л.Ю. Михайлова [и др.] // Сборник трудов «Физическая химия и технология в металлургии». – 2015. – С. 234 – 250.
17. Бабенко, А.А. Комплекс технологических приемов повышения стойкости футеровки конвертеров при переделе фосфористых чугунов / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, М.Ф. Витущенко [и др.] // *Черная металлургия*. – 2015. – № 2 (1382). – С. 78 – 82.
18. Бабенко, А.А. Повышение стойкости футеровки конвертеров при переделе углеродистого полупродукта на сталь / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, М.С. Фомичев [и др.] // *Черная металлургия*. – 2013. – № 8. – С. 59 – 63.

19. Yinxiang, Z. Slag splashing Technology for Converter //Steelmaking. – 2003. – V. 1. – P. 12 – 18.
20. Бабенко, А.А. Влияние содержания оксида магния на рафинирующие свойства конвертерных шлаков / А.А. Бабенко, Л.Ю. Кривых, В.В. Левчук // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 4. – С. 20 – 23.
21. Кольман, Т. Сравнительный анализ кислородных конвертеров. Оценка технического обслуживания и технологического процесса / Т. Кольман, Х. Яндл // Черные металлы. – 2014. – № 5. – С. 43 – 49.
22. Wu, W. Combined Blowing and Slag Splashing Process for Large Converter / W. Wu, Y. Zhu, S. Pan // China Metallurgy. – 2013. – V. 8. – P. 3 – 9.
23. Zhong, L. Industrial experiment of steelmaking in a top-bottom-side blown converter with slag splashing process / L. Zhong, X. Zhou, Y. Zhu //Steel research international. – 2012. – V. 83. – №. 1. – P. 16 – 21.
24. Васильев, Д.В. Исследование влияния шлакового режима на дефосфорацию и стойкость футеровки кислородного конвертера / Д.В. Васильев, Д.Ю. Кузнецов, С.В. Куберский [и др.] // Черная металлургия. – 2009. – № 3. – С. 35 – 40.
25. Chen, G.J. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking / G.J. Chen, S.P. He // Ironmaking &Steelmaking. – 2015. – V. 42. – № 6. – P. 433 – 438.
26. Obinata, T. High-MgO-Slag operations in BOF. / T. Obinata // Role Slag Basic Oxygen Steelmaking Process: Proceedings Symposium. – Hamilton, 1997. - P. 11/1-11/35.
27. Шюрман, Э. Влияние содержания MgO в шлаке и донной продувки на степень дефосфорации и десульфурации при выплавке стали в конвертере по способу SDS / Э. Шюрман, Г. Ман, Д. Нолле, У. Ойленбург // Черные металлы. – 1985. – № 2. – С. 31 – 36.
28. Процесс ЛД с применением доломита, разработанный фирмой Штальверке Пайне –Зальцгиттер // Черные металлы. – 1984. – № 2. – С. 23.

29. Микроструктура кислородно-конвертерных шлаков / В. Мюнхберг, К.-Х. Обст, Г. Ман, Д. Нолле // Черные металлы. – 1981. – № 9. – С. 20 – 23.
30. Фиге, Л. Применение мягкообожженного доломита и профилактического торкретирования с целью повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / Л. Фиге, Х. Шрёэр, В. Реш // Чер. металлы. – 1983. – № 6. – С. 23-29.
31. Klages, G. Entwicklung der Konverterhaltbarkeit in den Stahlwerken der Thyssen Stahe AG nach Einfuhrung des TBM-Verfahrens / G. Klages, E. Schulz // Thyssen Technische Berichte. – 1984. – V. 16. – № 2. – P. 103-108.
32. Бойченко, Б.М. Служба периклазоуглеродистых огнеупоров в шлаковом поясе конвертера / Б. М. Бойченко, В. И. Пищида, К. Г. Низяев, С. Н. Кравец // Новые огнеупоры. – 2005. – № 1. – С. 29-31.
33. Демидов, К.Н. Использование высокомагнезиальных материалов в конвертерной плавке / К. Н. Демидов, А. М. Ламухин, О. Ф. Шатилов [и др.] // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков (Магнитогорск, 15-17 октября 2002 г.). - М.: Черметинформация, 2003. - С. 186-193.
34. Leonard, R. J. Dolomite additions required to saturate BOF-slugs with MgO / R. J. Leonard, R. H. Herron // Open Hearth Proceedings. – 1977. – V. 60. – P. 127 – 133.
35. Grosjean, J. C. Consistance des laitiers de convertisseurs et tartinage / J. C. Grosjean, P. V. Riboud // Revue de Metallurgie. – 1983. – V. 80. – № 7. – P. 571 – 584.
36. Третьяков, Е.В. Шлаковый режим кислородно-конвертерной плавки / Е.В. Третьяков, В.К. Дидковский – М.: Металлургия, – 1972. – 144 с.
37. Сунаяма, Х. Скорость коррозии периклазоуглеродистых изделий шлаков, содержащим FeO / Х. Сунаяма, М. Кавабара, Т. Кономото // Новости черной металлургии за рубежом. – 1998. – № 3. – С. 120 – 121.
38. Wu, Y. The application of laser contouring system on converter lining for steelmaking / Y. Wu, J. Gu, S. Wang // Metalurgia International. – 2013. – V. 18. – №. 11. – P. 8 – 15.

39. Кашеев, И.Д. Свойства и применение огнеупоров: справочное издание / И.Д. Кашеев. – М.: Теплотехник, 2004. – 352 с.
40. Vert, T. Refractory Material Selection for Steelmaking. / T. Vert, J. Smith – John Wiley & Sons, 2016. – 390 P.
41. Хорошавин, Л.Б. Огнеупоры – проблемы, пути развития, инвестиции / Л.Б. Хорошавин, Е.Е. Гришенков // Новые огнеупоры. – 2003. – №1. – С. 61 – 63.
42. Sugita, K. Historical overview of refractory technology in the steel industry / K. Siguta // SHINNITETSU GIHO. – 2008. – V. 388. – P. 8 – 16.
43. Аксельрод, Л.М. Огнеупорные материалы и способы повышения стойкости футеровки конвертеров по опыту ООО «Группа Магнезит» / Л.М. Аксельрод, А.П. Лаптев, А.А. Шляпин // Новые огнеупоры. – 2008. – №1. – С. 5-9.
44. Аксельрод, Л.М. Выплавка стали, применение огнеупорных материалов, корректировка тенденций, прогноз // Новые огнеупоры. – 2012. – №3. – С. 117 – 129.
45. Смирнов, А.Н. Перспективы развития рынка огнеупоров для сталеплавильного комплекса Украины // Metallургический комплекс. Украина – Мир. – 2010. – №4. – С. 16 – 23.
46. Перепелицын, В.А. Эффективные огнеупорные материалы для металлургии и литейного производства / В.А. Перепелицын, В.Г. Куталов // Новые огнеупоры. – 2012. – №2. – С. 27 – 31.
47. Raja, B. V. Status & outlook of indian refractory industry / B.V. Raja // Steelworld. – 2006. – V. 6. – №. 6. – P. 9 – 13.
48. Маргишвили А.П. Совершенствование оксидоуглеродистых огнеупоров ОАО БКО / А.П. Маргишвили, А.В. Можжерин, А.П. Дука, В.А. Мусевич // Новые огнеупоры. – 2010. – №11. – С. 11 – 14.
49. Сердюков, А.А. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, А.Н. Смирнов // Металлы и литье Украины. – 2010. – № 9-10. – С. 4 – 7.

50. Бойченко, Б.М. Влияние ввода в состав огнеупоров антиоксидантов на скорость износа футеровки кислородных конвертеров / Б.М. Бойченко, В.И. Пищида, М.С. Тарнавский // *Черная металлургия*. – 2008. – № 12. – С. 52 – 55.

51. Валуев, А.Г. Опыт эксплуатации периклазоуглеродистой футеровки конвертера из изделий производства RHI / А.Г. Валуев, И.В. Говгаленко, И.Г. Афанасьев // *Новые огнеупоры*. – 2011. – №3. – С. 103 – 105.

52. Молчанов, Л.С. Композиционные огнеупорные материалы для высокостойкой футеровки кислородных конвертеров / Л.С. Молчанов, К.Г. Низяев, Б.М. Бойченко [и др.] // *Черная металлургия*. – 2013. – № 11. – С. 56 – 59.

53. Цепак, А. Новая саморастекающаяся масса для горячего ремонта футеровки кислородного конвертера / А. Цепак, В. Экштайн, М. Каппель // *Новые огнеупоры*. – 2012. – №5. – С. 9 – 11.

54. Тассо, П. Периклазоуглеродистые огнеупоры для быстрого ремонта футеровки кислородных конвертеров / П. Тассо, К. Уиллоби // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2014. – № 1-2. – с. 72 – 75

55. Bock, M. Uso de cal de dolomita en convertidores LD / M. Bock, C. Oehler // *Siderurgia XCV*. – 2001. – № 10. – P. 22-26.

56. Influence of dolomitic lime reactivity on BOF- refractory consumption / H. Laye, P. V. Riboud, R. D. Schmidt-Whitley, P. Papier // *Role Slag Basic Oxygen Steelmaking Process. - Proceedings Symposium*. – Hamilton, 1977. – P. 13/1 –13/6.

57. Bosley, J. J. The effect of dolomitic lime on BOP operations at South Works / J. J. Bosley, R. S. Mulhauser, P. W. Rosenthal // *Role Slag Basic Oxygen Steelmaking Process: Proceedings Symposium*. – Hamilton, 1977 – P. 10/1 – 10/14.

58. Muscatello, D. J. Striving for optimum BOF efficiency improving process practices, slags and charge calculations / D. J. Muscatello, G. J. Grasley // *Open Hearth Proceedings*. – 1977. – V. 60. – P. 3 – 21.

59. Дмитриенко, Ю.А. Опыт производства и применения модификаторов сталеплавильных шлаков / Ю.А. Дмитриенко, В.Н. Коптелов, И.Г. Маряsev, К.Н. Демидов // *Сталь*. – 2005. – №1. – С. 30 – 33.

60. Демидов, К.Н. Использование саморазрушающихся магнезиальных гранул для нанесения гарнисажа на футеровку конвертера / К.Н. Демидов, В.Г. Овсянников, О.Ф. Шатилов [и др.] // Сталь. – 2004 – № 12. – С. 37 – 38.
61. Демидов, К.Н. Выплавка стали в конвертерах с использованием флюсов с высоким содержанием оксидов магния / К.Н. Демидов, А.М. Ламухин, О.Ф. Шатилов [и др.] // Новые огнеупоры. – 2005. – №5. – С.13 – 21.
62. Терентьев, Е.А. Физико-химическое исследование магнезиально-глиноземистых флюсов и опробование их в конвертерном производстве / Е.А. Терентьев, К.Н. Демидов, И.Г. Мирясев [и др.] // Новые огнеупоры. – 2008. – № 12. – С. 28 – 32.
63. Кушнарев, А.В. Опыт использования MgO-содержащих материалов для повышения стойкости футеровок конвертеров / А.В. Кушнарев, Э.А. Вислогузова, А.С. Устенко, С.А. Ремиго // Новые огнеупоры. – 2007. – №4. – С. 3 – 5.
64. Возчиков, А.П. Повышение стойкости футеровки конвертера с применением магнезиально-глиноземистого флюса при переделе высокофосфористых чугунов / А.П. Возчиков, К.Н. Демидов, Л.А. Смирнов [и др.] // Черная металлургия. – 2013. – № 7. – С. 53 – 57.
65. Бабенко, А.А. Фазовый состав конвертерных магнезиальных шлаков и технологические приемы повышения износоустойчивости формируемого на футеровке гарнисажа / А.А. Бабенко, Л.Ю. Кривых, Н.В. Мухранов [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 2. – С. 37 – 40.
66. Бабенко, А.А. Исследование фазового состава конвертерных магнезиальных шлаков и управление процессом формирования износоустойчивого гарнисажа / А.А. Бабенко, Н.В. Мухранов, В.В. Левчук [и др.] // Черная металлургия. – 2010. – № 11. – С. 35 – 38.
67. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. – М.: Металлургия, 1985. – 480 с.
68. Кривых, Л.Ю. Технология конвертерной плавки с формированием износоустойчивого гарнисажа на базе известково-магнезиальных железистых

шлаков / Л.Ю. Кривых, А.А. Бабенко, С.А. Ремиго // Черная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 54 – 57.

69. Бабенко, А.А. Выбор рациональных направлений повышения износоустойчивости магнезиальной футеровки конвертеров // Новые огнеупоры. – 2005. – №1. – С. 26 – 28.

70. Демидов, К.Н. Использование ожелезненного известково-магнезиального флюса в конвертерной плавке / К.Н. Демидов, С.М. Чумаков, С.Д. Зинченко // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 46 – 48.

71. Демидов, К.Н. Формирование магнезиальных шлаков рационального состава при конвертерном переделе высокофосфористых чугунов и нанесение износоустойчивого шлакового гарнисажа на футеровку с применением магнезиально-глиноземистого флюса / К.Н. Демидов, М.Ф. Витущенко, Л.А. Смирнов [и др.] // Новые огнеупоры. – 2012. - №3. – С. 86.

72. Попов, Е.С. Примерение высокомагнезиальных флюсов в конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь» / Е.С. Попов, М.П. Орличенко, А.Б. Лятин [и др.] // Сталь. – 2015. – № 4. – С. 16 – 20.

73. Турчин, М.Ю. Практика применения высокомагнезиальных флюсов для модификации конвертерного шлака 160-т конвертеров ОАО НТМК / М.Ю. Турчин, В.В. Левчук, С.А. Ремиго // Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 27 – 31

74. Messina, C.I. Slag splashing in the BOF - World wide status, practices and results // Iron and Steel Engineer. – 1996. – № 5. – P. 17 – 19.

75. Гудман, Н. Вспенивание шлака в кислородных конвертерах // Steel Times International. – 1996. – № 4. – С.3 – 4.

76. Macanley, D. Engineering developments lead to greater economy // Steel Times International. – 1996. – № 5. – P. 12 – 14.

77. Hess, G. M. BOS Innovation // 33 Metalproducing. – 1995. – № 9. – P. 55, 58, 60, 62, 64, 81.

78. Schriefer, J. Making a more reliable heat in the BOF // New Steel. – 1996. – № 5. – P. 48 – 52.

79. Тахаутдинов, Р.С. Обработка технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку 375-т конвертеров / Р.С. Тахаутдинов, В.Г. Овсянников, Т.К. Прищепова и др. // Сталь. – 1999. – № 11. – С.27 – 28.

80. Соколов, В.В. Совершенствование технологии производства стали в кислородно-конвертерных цехах / В.В. Соколов, В.П. Комшуков, В.М. Машинский, В.Д. Горбунов // Metallurg. – 2003. – № 7. – С. 59.

81. Югов, П.И. Энергосберегающая технология нанесения шлакового гарнисажа и выплавки конвертерной стали / П.И. Югов, В.В. Соколов, А.Б. Юрьев и др. // Бюллетень “Черная металлургия.”-2002.-№ 12.-С.24-27.

82. Sian, C. Slag splashing for Bao Steel's 300 metric ton BOF and crystallographic structure of its slag / C. Sian, Y. Wenyuan, Z. Conglie // Iron and Steelmaker. – 2000. – № 7. – P. 39 – 41.

83. Шарандин, К.Н. Исследование влияния состава конечного конвертерного шлака на эффективность технологии нанесения гарнисажа / К.Н. Шарандин, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков // Черная металлургия. – 2012. – № 11. – С. 54 – 58.

84. Айзатулов, Р.С. Совершенствование способов ремонта футеровки 160-т конвертеров с применением нейтральных газов / Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, В.В. Соколов и др. // Сталь. – 1999. – № 5. – С. 39 – 42.

85. Тахаутдинов, Р.С. Совершенствование методов контроля за эксплуатацией футеровки конвертеров / Р.С. Тахаутдинов, А.Д. Носов, В.Ф. Дьяченко и др. // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков (г. Магнитогорск, 15-17 октября 2002 г.), ОАО “Черметинформация.” – М.: 2003. – С. 89 – 93.

86. Рашников, В.Ф. Разработка и внедрение комплекса мероприятий по повышению производства и качества выплавляемой стали в кислородно-конвертерных цехах / В.Ф. Рашников, А.А. Мордашов, С.М. Чумаков и др. // Metallurg. – 2000. – № 7. – С. 43-44.

87. Greco, L. Installation and Start-up of Slag Splashing at Algoma Steel Inc. / L. Greco, A. McGowan // Steelmaking Conference Proceedings.-1997.- P. 97-100.

88. Пат. РФ 2426797. Способ выплавки стали в конвертере / А.А. Бабенко, С.В. Виноградов, Ю.А. Данилин [и др.], ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат», Заявл. 20.04.2010. Опубл. 20.08.2011.

89. Пат. РФ 2426798. Способ подготовки шлака для нанесения гарнисажа на футеровку конвертера / А.А. Бабенко, С.В. Виноградов, Ю.А. Данилин [и др.], ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат», Заявл. 20.04.2010. Опубл. 20.08.2011.

90. Синельников, В.О. Моделирование вязкости остаточного шлака при раздувке шлака кислородного конвертера // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – № 7-2. – С. 464 – 468.

91. Суворов, С.А. Модельное представление и параметризация процесса образования гарнисажного слоя на поверхности огнеупорной футеровки кислородного конвертера / С.А. Суворов, В.В. Козлов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2010. – № 8. – С. 3 – 8.

92. Graveland-Gisolf, E. Slag-droplet model: a dynamic tool to simulate and optimise the refining conditions in BOF / E. Graveland-Gisolf, P. Mink, A. Overbosh // Steel research international. – 2003. – V. 74. – №. 3. – P. 125 – 130.

93. Суворов, С.А. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футеровки конвертера и ресурс эксплуатации / С.А. Суворов, В.В. Козлов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 7-8. – С. 3 – 6.

94. Охотский, В.В. Закономерности окончания продувки в конвертере. Свойства шлака // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 4. – С. 3 – 7.

95. Guo, H.M. Research of BOF protection technology by slag splashing / H.M. Guo, J. Yang // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications. – 2009. – V. 620. – P. 45 – 48.

96. Смирнов, А.Н. Оценка условий образования гарнисажного слоя на рабочей поверхности футеровки конвертера / А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин // Сталь. – 2014. – № 8. – С. 52 – 56.

97. Смирнов, А.Н. Повышение стойкости футеровки и совершенствование методов обслуживания современных большегрузных конвертеров / А.Н. Смирнов, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, К.Н. Шарандин // Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 26 – 31.

98. Бабенко, А.А. Освоение комплекса технологических приемов повышения стойкости футеровки конвертеров при переделе углеродистого полупродукта на сталь / А.А. Бабенко, Л.А. Смирнов, М.С. Фомичев / Сталь. – 2012. – №11. – С. 15

99. Суворов, С.А. Проектирование образования гарнисажа на поверхности футеровки конвертера и оптимизация расхода модификатора / С.А. Суворов, В.В. Козлов // Новые огнеупоры. – 2011. – №1. – С. 35 – 37.

100. Нечепоренко, В.А. Технология ошлакования футеровки кислородных конвертеров / В.А. Нечепоренко, Н.М. Омесь, Г.Ф. Боровиков и др. // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 3 – С.22 – 23.

101. Вислогузова, Э.А. Повышение стойкости футеровок металлургических агрегатов за счет использования новых огнеупоров и схем футеровок / Э.А. Вислогузова, А.В. Шкляев // Черная металлургия. – 2011. – № 3. – С. 72 – 76.

102. Пат. РФ 2164953. Способ футеровки кислородного конвертера / Р.С. Айзатулов, А.Г. Смолянинов, Е.В. Протопопов [и др.], ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат». Заявл. 28.03.2000. Оpubл. 10.04.2001.

103. Пат. РФ 2291902. Футеровка сталеплавильного конвертера / Н.И. Воробьев, Д.А. Лившиц, А.Л. Подкорытов [и др.], ОАО «Челябинский металлургический комбинат». Заявл. 21.03.2005. Оpubл. 20.01.2007.

104. Чернятевич, А.Г. Вопросы совершенствования технологического маршрута производства кислородно-конвертерной стали // Черная металлургия. – 2011. – №4. – С. 56 – 61.

105. Соколов, В.В. Аналитические исследования процессов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. Теория подобия / В.В. Соколов, Е.В. Протопопов, К.М. Шакиров // Изв. вузов. Чер. Мет-ия. –2004. –№6. –С.12–15.

106. Ruuska, J. Analysis of splashing in Basic Oxygen Furnace through systematic modelling / J. Ruuska, A. Sorsa, S. Ollila, K. Leiviska // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – V. 48. – № 17. – P. 171 – 176.

107. Смирнов, А.Н. Моделирование элементов процесса нанесения гарнисажного покрытия на рабочий слой футеровки конвертера / А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин, А.Ю. Лизун // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 11. – С. 43 – 48.

108. Чигведу, Ч. Использование технологии разбрызгивания шлака для снижения интенсивности торкретирования и сокращения затрат на огнеупоры / Ч. Чигведу, Й. Кемпкен // Черные металлы. – 2006. – № 7-8. – С. 62 – 68.

109. Barron, M.A. Numerical Analysis of Slag Splashing in a Steelmaking Converter / M.A. Barron, I. Hilerio // Computer Technology and Application. – 2011. – V. 2. – № 9. – P. 828 – 834.

110. Протопопов, Е.В. Моделирование особенностей формирования шлакового гарнисажа на футеровке конвертера при продувке шлакового расплава газовыми струями / Е.В. Протопопов, В.В. Соколов, С.Е. Самохвалов // Вестник Сиб. отд. РАЕН. Отд. металлургии. СибГИУ. Новокузнецк. – 2003. – С. 31 – 43.

111. Kumar D.S. Converter life enhancement through optimization of operating practices / D.S. Kumar, G. Prasad, S.C. Ghorui, D. Mazumdar // Iron and Steelmaker. – 2007. – № 6. – P. 521 – 528.

112. Чернятевич, А.Г. Гидрогазодинамические закономерности нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, Е.А. Чубина // Металл и литье Украины. – 2005. – №3-4. – С. 45 – 47.

113. Протопопов, Е.В. Численное исследование гидродинамических процессов в полости конвертера при продувке шлакового расплава азотом через фурму с двухрядным расположением сопел / Е.В.Протопопов, В.В.Соколов, А.Г.Чернятевич, О.С.Самохвалов // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2003. – №12. – С.15-19.

114. Нугуманов, Р.Ф. Новое направление в совершенствовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / Р. Ф. Нугуманов, Е. В.

Протопопов, Т. Р. Галиуллин, А.Г. Чернятевич, Е.А. Чубина // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 12. – С. 7-12.

115. Чернятевич, А.Г. Инновационная технология формирования огнеупорного гарнисажа на футеровке конвертера / А. Г. Чернятевич, Е. Н. Сигарев, Е. А. Чубина // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). - Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2006. – С. 3-9.

116. Харлашин, П.С. Модель расчета термогазодинамических параметров струи при раздувке шлака в конвертере / П.С. Харлашин, А.Б. Ковура, Р.Д. Куземко // Черная металлургия. – 2011. – № 7. – С. 51 – 56.

117. Харлашин, П.С. Принципы моделирования процесса нанесения шлакового гарнисажа направленной раздувкой струями газа / П.С. Харлашин, Е.В. Протопопов, В.Я. Бакст [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. – 2010. – № 20. – С. 57 – 60.

118. Протопопов, Е.В. Разработка конструкций гарнисажных фурм и технологии газопорошкового ошлакования 350-т конвертеров Западно-Сибирского металлургического комбината / Е.В. Протопопов, Т.Р. Галиуллин, А.Г. Чернятевич, В.В. Соколов // Черная металлургия. – 2009. – № 9. – С. 34-38.

119. Чернятевич, А.Г. Разработка конструкций фурменных устройств для горячего ремонта футеровки конвертеров / А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов, Е.Н. Сигарев и др.// Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1-2. – С. 68-73.

120. Калимуллин, Р.Ф. Разработка и совершенствование конструкций гарнисажных фурм и технологии нанесения шлакового гарнисажа и торкрет-покрытий на футеровку конвертеров : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 / Калимуллин Руслан Фаузелович. – Новокузнецк., 2014. – 22 с.

121. Харлашин, П.С. К вопросу о повышении стойкости футеровки кислородных конвертеров / П.С. Харлашин, В.О. Синельников, Д.М. Асиил // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. – 2015. – № 30-1. – С. 80 – 89.

122. Чернятевич, А.Г. Этапы совершенствования конструкций гарнисажных фурм и технологий ошлакования футеровки 150т конвертеров ПАО «АрселорМитталл Кривой Рог» / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, И.В. Чернятевич [и др.] / Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 55 – 65.

123. Ларионов, А.А. Совершенствование методов нанесения на футеровку конвертеров факельного торкрет-покрытия // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. – 2010. – № 20. – С. 89 – 93.

124. Протопопов, Е.В. Моделирование параметров сверхзвуковой струи при раздувке шлака в конвертере / Е.В. Протопопов, Р.В. Калимуллин, А.Г. Чернятевич [и др.] //Изв. вуз. Черная металлургия. – 2012. – № 10. – С. 38–43.

125. Коотц, Т. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса / Т. Коотц, К. Беренс, Г. Маас, П. Баумгартен // Черные металлы. – 1965. – №15. – С. 42–52.

126. Протопопов, Е.В. Комбинированная фурма для восстановления футеровки конвертера / Е.В.Протопопов, В.В.Соколов, А.Г. Чернятевич [и др.] // Металлургия России на рубеже XXI века: сб. науч. тр. Международной науч.-практ. конф. / Под общ. ред. Е.В. Протопопова: СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – Том. II. – С. 293–297.

127. Мокринский, А.В. Направления повышения стойкости футеровки конвертеров / А.В. Мокринский, А.Н. Лаврик, В.В. Соколов [и др.] //Новые огнеупоры. – 2004. – № 8. – С. 16–18.

128. Bagryantsev, V.I. Causes of breakdown of oxygen-powder lances / V.I. Bagryantsev, A.L. Nikolaev, L.M. Poltoratskii, A.V. Chevalkov // Steel in Translation. 1988. Vol. 18. No. 2. P. 59–61.

129. Bagryantsev, V.I. The dynamics of particles in guniting in a twisted flow / V.I. Bagryantsev, A.L. Nikolaev, Z. Ya. Pavlenko // Refractories and Industrial Ceramics. 1988. Vol. 29. № 5 – 6. P. 387–391.

130. Калимуллин, Р.Ф. Изучение закономерностей распространения и формирования торкрет-факелов в процессе «горячего» ремонта футеровки

конвертеров / Р.В. Калимуллин, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич [и др.] // Вестник СибГИУ. – 2013. – № 3. – С. 9–13.

131. Гольдштик, М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, 1981. – 367 с.

132. Протопопов, Е.В. Перспективы применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, А.Н. Калиногорский // Литье. Металлургия. 2014: Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции. – Запорожье : ЗТПП, 2014. – С. 377 – 378.

133. Гупта, А. Закрученные потоки. / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред.– М.: Мир. 1987. – 588 с.

134. Кутателадзе, С.С. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. / С.С. Кутателадзе, Э.П. Волчков, В.И. Терехов. – Новосибирск: АН СССР, 1987. – 282 с.

135. Протопопов, Е.В. Исследование аэродинамики вихревой газовой струи для совершенствования технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку сталеплавильных агрегатов / Е.В. Протопопов, С.В. Фейлер, А.Н. Калиногорский // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2015. – С. 47 – 50.

136. Явойский, В.И. Применение пульсирующего дутья при производстве стали. / В.И. Явойский, А.В. Явойский, А.М. Сизов. – М.: Металлургия, 1985. – 176 с.

137. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др. – М.: Наука, 1984. – 716 с.

138. Гиршович, Т.А. Влияние разности скоростей фаз на турбулентную структуру струи, несущей тяжелые примеси / Т.А. Гиршович, В.А. Леонов// ИФЖ. – 1982. – № 4. – С. 541–548.

139. Фейлер, С.В. Изучение особенностей применения вихревых течений для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров / С.В. Фейлер,

Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 28–33.

140. Баптизманский, В.И. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – Киев, Донецк: Вища школа, 1984. – 343 с.

141. Багрянцев В.И., Волчков Э.П., Терехов В.И., Титков В.И. Исследование течения в вихревой камере лазерным доплеровским измерителем скорости // Препринт ИТФ СОАН СССР. – Новосибирск, 1980.

142. Кутателадзе, С.С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. / С.С. Кутателадзе, В.Е. Накоряков. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1987. – 301 с.

143. Калиногорский, А.Н. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 1. Особенности дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой / А.Н. Калиногорский, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, В.И. Багрянцев – Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58 – № 10. – С. 756–760.

144. Kalinogorskii, A.N. Application of refractory coatings to converter linings by swirling technology. 1. Breakup of liquid slag with a swirling lance / A.N. Kalinogorskii, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev // Steel in Transtation. 2015. – Vol. 45. – № 10. – P. 743–746.

145. Степанова, А.А. Результаты опробования продувки металла в 370-т кислородном конвертере семисопловой фурмой с центральным соплом / А.А. Степанова, И.М. Захаров, Д.Н. Чигасов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 2007. – № 1. – С. 20–22.

146. Пантейков, С.П. Современная конструкция фурменной головки и рациональные технологические режимы ее использования // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 2001. № 10. С. 30–33.

147. Харлашин, П.С. Модель расчета термодинамических параметров струи в конвертере / П.С. Харлашин, А.Б. Ковура, Р.Д. Куземко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 7. С. 97–100.

148. Тахаутдинов, Р.С. Исследование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / Р.С. Тахаутдинов, Б.А. Буданов, А.М. Столяров // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2001. № 8. С. 26–28.

149. Калиногорский, А.Н. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака / А.Н. Калиногорский, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, В.И. Багрянцев – *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2015. – Т. 58 – № 12. – С. 896–900.

150. Kalinogorskii, A.N. Application of refractory coatings to converter linings by swirling technology. 2. Motion of slag droplets / A.N. Kalinogorskii, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev // *Steel in Transtation*. 2015. – Vol. 45. – № 12. – P. 923–926.

151. Бабошин, В.М. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии / В.М. Бабошин, Е.А. Кривцева и др. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.

152. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1 / Пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

153. Протопопов, Е.В. Тепловая работа торкрет-гарнисажной фурмы для горячих ремонтов футеровки кислородных-конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, А.Н. Калиногорский // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2014. № 4. С. 21–25.

154. Тебеньков, Б.П. Рекуператоры для промышленных печей [Текст]. Изд. 4-е исправл. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 296 с.

155. Физико-химические методы исследования металлургических процессов: Учебник для вузов. / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников, Л.А. Пронин, Е.С. Филиппов. – М.: Металлургия, 1988 – 511 с.

156. Амелин, А.В. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров / А.В. Амелин, Е.В. Протопопов, А.Н. Калиногорский [и др.] // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 22 – 25.

157. Amelin, A.V. Formation of magnesia-slag coating on the lining of large converters/ A.V. Amelin, E.V. Protopopov, A.N. Kalinogorskii, S.V. Feiler // Steel in Transtation. 2014. – Vol. 44. – № 7. – P. 513–516.

158. G. Trömmel, G. Der Einfluß des Magnesiumoxyds auf die Gleichgewichte im System Fe-CaO-FeO_n-SiO₂ und auf die Schwefelverteilung bei 1600°C / G. Trömmel, K. Koch, W. Fix, N. Großkurth // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1969, № 12. – p. 969-978.

159. Протопопов, Е.В. Исследование фазовых равновесий в сложных оксидных системах для оптимизации формирования конвертерных магнезиальных шлаков рационального состава / Е.В. Протопопов, Н.Ф. Якушевич, А.Н. Калиногорский // Литье. Металлургия. 2015: Материалы XI Международной научно-практической конференции. – Запорожье : ЗТПП, 2015. – С. 377 – 378.

160. Протопопов, Е.В. Исследование особенностей формирования гарнисажа на футеровке большегрузных конвертеров при использовании высокомагнезиальных флюсов / Е.В. Протопопов, А.А. Пермяков, А.Н. Калиногорский // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – №4. – С. 32 – 35.

161. Протопопов, Е.В. Формирование магнезиальных шлаков для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Н. Калиногорский // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»: материалы Инновационного конвента. – Кемерово, 2014. – С. 363 – 366.

162. Протопопов, Е.В. Особенности шлакового режима конвертерной плавки при использовании высокомагнезиальных флюсов / Е.В. Протопопов, А.Н. Калиногорский // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции – Новокузнецк : Изд. Центр СибГИУ, 2014. – С. 106 – 111.

163. Протопопов, Е.В. Исследование минерального состава конвертерных магнезиальных шлаков для формирования износоустойчивого гарнисажа на футеровке агрегата / Е.В. Протопопов, А.Н. Калиногорский // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного научного симпозиума имени академика М. А. Усова. – Томск, 2014. – С. 138 – 140.

164. Протопопов, Е.В. Исследование минерального состава конвертерных магнезиальных шлаков для повышения износоустойчивости формируемого на футеровке гарнисажа / Е.В. Протопопов, В.В. Соколов, А.А. Пермяков, А.Н. Калиногорский // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды XVII Всероссийской научно-практической конференции – Новокузнецк : Изд. Центр СибГИУ, 2013. – С. 96 – 100.

ПРИЛОЖЕНИЯ

«Утверждаю»

Технический директор
ОАО «Евраз Объединенный
Западно-Сибирский
металлургический комбинат»

А.В. Амелин

2015 г.

СПРАВКА

о применении в производстве результатов выполненной аспирантом

Калиногорским Андреем Николаевичем

диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Исследование и совершенствование технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов»

Основные выводы, рекомендации диссертационной работы аспиранта кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» А.Н. Калиногорского, в частности, результаты исследования кристаллохимических и кристаллофизических параметров конвертерных магнезиальных шлаков и особенностей формирования гарнисажа на футеровке конвертеров при использовании высокомагнезиальных флюсов, а также результаты численного и низкотемпературного моделирования раздувки шлака вихревыми газовыми струями, разработки и исследования параметров охлаждения дутьевых устройств для нанесения шлакового гарнисажа, полученные при непосредственном участии автора, были использованы при совершенствовании технологии «горячих» ремонтов футеровки 350-тонных конвертеров ККЦ №2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Материалы диссертации использованы при создании технической документации по разработке дутьевых устройств и обоснованию параметров рационального охлаждения гарнисажных фурм для «горячих» ремонтов кислородных конвертеров.

Результаты исследований использованы при разработке дополнений к технологической инструкции (ТИ 107-СТ КК2-01-12) по оптимизации технологии выплавки стали и ошлакования футеровки агрегатов с использованием высокомагнезиальных флюсов для повышения стойкости футеровки конвертеров в ККЦ №2.

Начальник сталеплавильного
производства



Ал. В. Амелин

Начальник технического
управления комбината



В.В. Хомиченок

Начальник ККЦ №2



М.С. Приходько

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

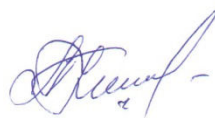
УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
и инновациям,
д.т.н., профессор
М.В. Темлянецв
« 24 » 2016 г.



АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы «Исследование и совершенствование технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов», выполненной на кафедре металлургии черных металлов аспирантом А.Н. Калиногорским под руководством д.т.н., профессора Е.В. Протопопова, внедрены в учебный процесс при подготовке студентов, обучающихся по направлению подготовки 22.03.02 – Металлургия, и включены в программы учебных дисциплин: «Теория и технология производства стали», «Современные технологии производства стали», «Конструкции агрегатов», а также КНИР, курсовое проектирование и выполнение выпускной квалификационной работы решением кафедры металлургии черных металлов (выписка из протокола заседания кафедры № 6 от 03.03.2016 г.).

Начальник управления научных исследований, к.т.н., доцент



А.И. Куценко

Начальник учебно-методического управления, к.т.н., доцент



О.Г. Приходько

Заведующий кафедрой металлургии черных металлов, к.т.н., доцент



С.В. Фейлер