

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
(ФГАОУ ВПО «УрФУ»)

На правах рукописи



МЕТЕЛКИН АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТИ ФУТЕРОВКИ АГРЕГАТОВ
КОВШОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н. О.Ю. Шешуков

Екатеринбург - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ НА УЧАСТКЕ КОВШОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ИЗ КОТОРЫХ ВЫПОЛНЕНА ФУТЕРОВКА ДАННЫХ АГРЕГАТОВ..... | 10 |
| 1.1 Агрегаты, используемые на участке ковшовой обработки стали ОАО «ЕВРАЗ НТМК», типы применяемых огнеупоров и схемы футеровки.... | 10 |
| 1.2 Типы огнеупорных изделий, условия их эксплуатации и способы повышения стойкости футеровки сталеразливочного ковша | 15 |
| 1.3 Типы огнеупорных изделий, условия их эксплуатации на вакууматоре и способы повышения стойкости футеровки вакуум – камеры..... | 26 |
| 1.4 Цели и задачи исследования | 33 |
| 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ВАКУУМАТОРОВ И ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИКЛАЗОХРОМИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФУТЕРОВКЕ ВАКУУМ – КАМЕР | 35 |
| 2.1 Технологические приемы повышения стойкости футеровки вакуум – камеры..... | 35 |
| 2.2 Изучение факторов, влияющих на износ внутренней рабочей футеровки погружных патрубков вакуум –камеры..... | 41 |
| 2.3 Исследование структуры периклазохромитовых изделий, применяемых в футеровке циркуляционных вакууматорах | 47 |
| 2.4 Выводы к главе 2..... | 58 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3 | ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ШЛАКА НА ИЗНОС ФУТЕРОВКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА УЧАСТКЕ КОВШОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ И ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ШЛАКА..... | 59 |
| 3.1 | Оценка влияния состава шлака на износ футеровки сталеплавильных агрегатов участка ковшовой обработки стали | 59 |
| 3.2 | Анализ влияния физико-химических свойств шлака на износ футеровки сталеразливочных ковшей в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК» | 71 |
| 3.3 | Исследование влияния гомогенной составляющей шлака на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий | 81 |
| 3.4 | Оценка влияния насыщенности гомогенной составляющей шлака по содержанию MgO на износ футеровки | 84 |
| 3.5 | Определение рационального количества магнийсодержащих добавок.... | 85 |
| 3.6 | Расчет рационального состава шлака на АКП конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК» | 86 |
| 3.7 | Оценка защитных свойств гарнисажа, формируемого шлаком на рабочем слое футеровки металлургических агрегатов | 107 |
| 3.8 | Выбор материалов для наведения рафинирующего шлака | 117 |
| 3.9 | Выводы к главе 3..... | 118 |
| 4 | РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА ОАО «ЕВРАЗ НТМК» | 119 |
| 4.1 | Оценка существующей технологии наведения шлака в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК» | 119 |
| 4.2 | Оценка глиноземсодержащих шлакообразующих материалов | 122 |
| 4.3 | Промышленные испытания глинозем содержащих материалов | 128 |
| 4.4 | Выводы к главе 4..... | 132 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 134 |

| | |
|---|-----|
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 139 |
| Приложение А (обязательное) Полезная модель к патенту №2010101558/22. «Патрубок погружной для вакууматора» | 157 |
| Приложение Б (обязательное) Заключение по использованию импортных периклазохромитовых огнеупоров в футеровке вакуум – камер..... | 159 |
| Приложение В (обязательное) Заключение по использованию импортных периклазохромитовых огнеупоров фирмы «КРОК» в футеровке вакуум – камер..... | 164 |
| Приложение Г (обязательное) Акт по испытаниям футеровки днища вакууматора №1 фирмы «DUFERCO»..... | 167 |
| Приложение Д (обязательное) Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов при внепечной обработке стали | 173 |
| Приложение Е (обязательное) Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов (брикетов производства ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург) при внепечной обработке стали..... | 177 |
| Приложение Ж (обязательное) Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов при внепечной обработке стали | 181 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время доля затрат на огнеупоры для агрегатов ковшовой обработки стали может достигать 1,5% себестоимости металла даже без учета затрат на ремонты и потери при простоях выведенных на ремонт агрегатов. Поэтому повышение стойкости футеровки, определяющей межремонтный ресурс агрегатов – одна из важнейших научно-технических задач.

Снижение удельных затрат за счет уменьшения стоимости огнеупорных изделий признано нецелесообразным, поскольку предопределяет потребление огнеупоров пониженного качества и снижение надежности работы агрегатов. Практика показала необходимость более сложного, комплексного подхода к проблеме стойкости огнеупоров – оптимизации условий их эксплуатации и рациональных конструктивных решений. В то же время, некоторые пути решения данной проблемы встречают определенные трудности. Использование дифференцированной футеровки на агрегатах внепечной обработки стали осложняет задачу оптимизации технологического режима, поскольку ковшевой шлак взаимодействует с разными типами огнеупоров по ходу обработки и разливки стали.

Шлак оказывает как негативное воздействие на футеровку, так и позитивное – через возможность образования, при определенных условиях, защитного гарнисажа. Задача усложняется еще больше, с учетом основной технологической функции шлака – рафинирования металла и соответствующими требованиями к его составу и свойствам.

С другой стороны, эффективность мероприятий по улучшению условий эксплуатации огнеупоров на практике ограничена чисто техническими факторами. Зачастую, в футеровке имеются зоны повышенного износа, интенсифицированного, например, перепадами температур или особо высокими скоростями движения расплавов; причем, именно эти зоны определяют стойкость всей конструкции в целом. Без применения конструктивных решений, выравнивающих износ огнеупоров по всей футеровке агрегата, корректировка шлакового режима будет мало-

эффективной, поскольку она в меньшей степени затронет зоны интенсивного износа.

Таким образом, необходимо проведение комплексных исследований по рациональному дизайну футеровок агрегатов ковшовой обработки и оптимизации состава и свойств ковшевых шлаков.

Цель данной работы – разработка комплекса мероприятий, направленного на повышение ресурса футеровки агрегатов ковшовой обработки стали, на основе улучшения дизайна футеровки, подбора рациональных структуры и свойств огнеупорных изделий, подбора рационального состава рафинировочного шлака.

В соответствии с поставленной целью основными задачами исследований являлись: определение основных факторов, влияющих на износ футеровки агрегатов ковшовой обработки; уточнение фактических температурных условий эксплуатации огнеупоров; разработка дизайна футеровки, направленного на повышение стойкости и надежности работы агрегатов ковшовой обработки стали; петрографические исследования периклазохромитовых изделий, оценка влияния структуры огнеупоров на их удельный износ, подбор рациональных параметров огнеупорных изделий, применяемых в вакуум-камере; исследования влияния состава шлака на износ футеровки сталеразливочного ковша (стальковша) и вакуум-камеры; выбор рациональных параметров шлака, наводимого на АКП, который обладает хорошими рафинирующими свойствами, является малоагрессивным к футеровке и формирует защитный гарнисаж; разработка предложений по составу и промышленные испытания новых шлакообразующих материалов.

Научная новизна работы заключается в том, что подтверждена зависимость удельного износа рабочей футеровки сталеплавильных агрегатов от состава шлака. Показано, что агрессивность шлаков по отношению к футеровке снижается при достижении насыщения шлака по содержанию MgO. Установлены границы насыщения гомогенной составляющей шлака оксидом магния в зависимости от содержания в шлаке CaO, SiO₂ и Al₂O₃.

Впервые показана возможность снижения предела насыщения гомогенной составляющей шлака оксидом магния путем повышения содержания Al₂O₃ в шла-

ке. Предложена схема регулирования шлакового режима в зависимости от вида огнеупорных изделий, применяемых в футеровке агрегатов ковшевой обработки стали (АКОС): повышая концентрацию MgO и Al_2O_3 в шлаке, возможно снизить его агрессивность к периклазоуглеродистым ($MgO-C$) и шпинельным ($MgO \cdot Al_2O_3$) огнеупорам, а также обеспечить формирование гарнисажа содержащего шпинель на огнеупорах, состоящих не только из $MgO \cdot Al_2O_3$, но из $MgO \cdot Cr_2O_3$. При этом рафинирующие свойства ковшевых шлаков не ухудшаются и использование АКП и вакууматора реализуются полнее.

Впервые исследован температурный режим системы «металл-шлак-футеровка» по ходу обработки стали на АКП. На основании исследований температурного режима показана возможность формирования рационального состава шлака с применением глиноземсодержащих добавок, насыщенного по содержанию MgO при температуре до $1600^\circ C$.

Проведена оценка влияния структуры периклазохромитовых изделий на стойкость и удельный износ футеровки АКОС. Показано, что наибольшая стойкость футеровки достигается с применением изделий, для производства которых используется плавный синтетический периклазохромит с размером кристаллов более 2 мм и равномерным распределением зерен хромшпинелида, упрочненных тонкодисперсной фракцией плавного периклазохромита.

Практическая значимость работы заключается в определении рационального состава шлака, наводимого на АКП, обладающего низкой агрессивностью к футеровке сталеплавильных агрегатов и обеспечивающего достаточные рафинирующие свойства в условиях участка ковшевой обработки стали конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Предложены шлакообразующие добавки, применение которых позволило: улучшить рафинирующие свойства шлака по показателю десульфурации на 20%; повысить стойкость футеровки и время эксплуатации металлургических агрегатов на участке ковшевой обработки стали - циркуляционных вакууматоров на 39,4%, сталеразливочных ковшей на 8%.

Разработаны и внедрены технологические решения по дизайну футеровки, применены огнеупорные изделия с рациональными параметрами, что позволило

уменьшить количество аварийных выводов вакуум - камер из работы, повысить время их эксплуатации на 20-30% и упростить процесс выплавки транспортного металла в конвертерном цехе.

Для решения поставленных задач применен комплекс методов, включающий расчёты характеристик шлаков по полимерной теории строения шлаков, термодинамическое моделирование реакций в системе «шлак-огнеупор» с помощью специальных компьютерных программ, петрографические исследования огнеупорных изделий на границе перехода «огнеупор-шлак», средства вычислительной техники и методы математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту заключаются в следующем:

1. Комплекс технологий и технических решений, гарантированно обеспечивающий повышение ресурса футеровок агрегатов ковшовой обработки стали при сохранении качества металла.

2. Эффективное сочетание химико-минерального состава и прямо связанной микроструктуры изделий, обуславливающее высокую износоустойчивость новых огнеупоров магнезиально-шпинелидного состава.

3. На основании оценки интенсивности механического, термического и коррозионного износа усовершенствован дизайн футеровки путем создания дифференцированной конструкции каждого элемента.

4. Организация рационального шлакового режима – главный резерв повышения стойкости футеровки и качества стали, включающий корректировку насыщения шлака по оксиду магния, введение глиноземистого материала (до содержания в шлаке не более 27% Al_2O_3) и формирование шпинельного гарнисажа на рабочей поверхности огнеупоров.

Достоверность полученных результатов подтверждается практическим внедрением предложенных огнеупоров с рациональной структурой для агрегатов ковшовой обработки стали и шлакообразующих материалов, разработанных с учетом новых сведений о процессе, публикацией результатов в печати и их апробацией на научно-технических конференциях и научных форумах.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на 70-й межрегиональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2012 г.), 71-й межрегиональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2013 г.), научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2013 г.).

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ НА УЧАСТКЕ КОВШОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ИЗ КОТОРЫХ ВЫПОЛНЕНА ФУТЕРОВКА ДАННЫХ АГРЕГАТОВ

1.1 Агрегаты, используемые на участке ковшовой обработки стали ОАО «ЕВРАЗ НТМК», типы применяемых огнеупоров и схемы футеровки

Ковшовая обработка стали представляет заключительную часть технологического процесса выплавки стали, целью которого является доведение до требуемых конечных значений основных параметров сталеплавильного процесса – химического состава стали, ее температуры, а также обеспечение однородности (гомогенности) металла по указанным параметрам [1].

Современная технология выплавки стали является двухстадийной, проводимой в двух рабочих объемах: основное рафинирование в сталеплавильном агрегате и дополнительное в сталеразливочном ковше [1, 2].

К дополнительному рафинированию принято относить обезуглероживание, дегазацию, десульфурацию и удаление неметаллических включений (НВ) [1].

Обезуглероживание металла в ковше достигается за счет его обработки вакуумом и нейтральным газом. Дегазация металла в ковше – это в основном удаление водорода и азота. Для повышения эффективности протекания физико-химических процессов, необходимо активное перемешивание взаимодействующих фаз, которое достигается за счет продувки металла нейтральным газом [1-4].

Попытки применения электромагнитного перемешивания металла в сталеразливочном ковше не имели успеха из-за необходимости использования дорогого и сложного оборудования. К тому же, электромагнитное перемешивание менее эффективно по сравнению с продувкой нейтральным газом [1].

Исходя из поставленных задач перед ковшовой обработкой металла, на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» применяются следующие агрегаты: сталеразливочные ковши, четыре АКП и два циркуляционных вакууматора.

Сталеразливочный ковш относится к основному металлургическому оборудованию и применяется для приема, транспортировки, обработки стали в ковше и разливки расплавленного металла [5].

Существуют несколько типов вакуумной обработки: порционное вакуумирование, циркуляционное вакуумирование, вакуумирование в струе металла и вакуумирование в ковше [1-4].

Исходя из поставленных задач и условий работы агрегатов, применяют любой из выше перечисленных способов вакуумирования металла.

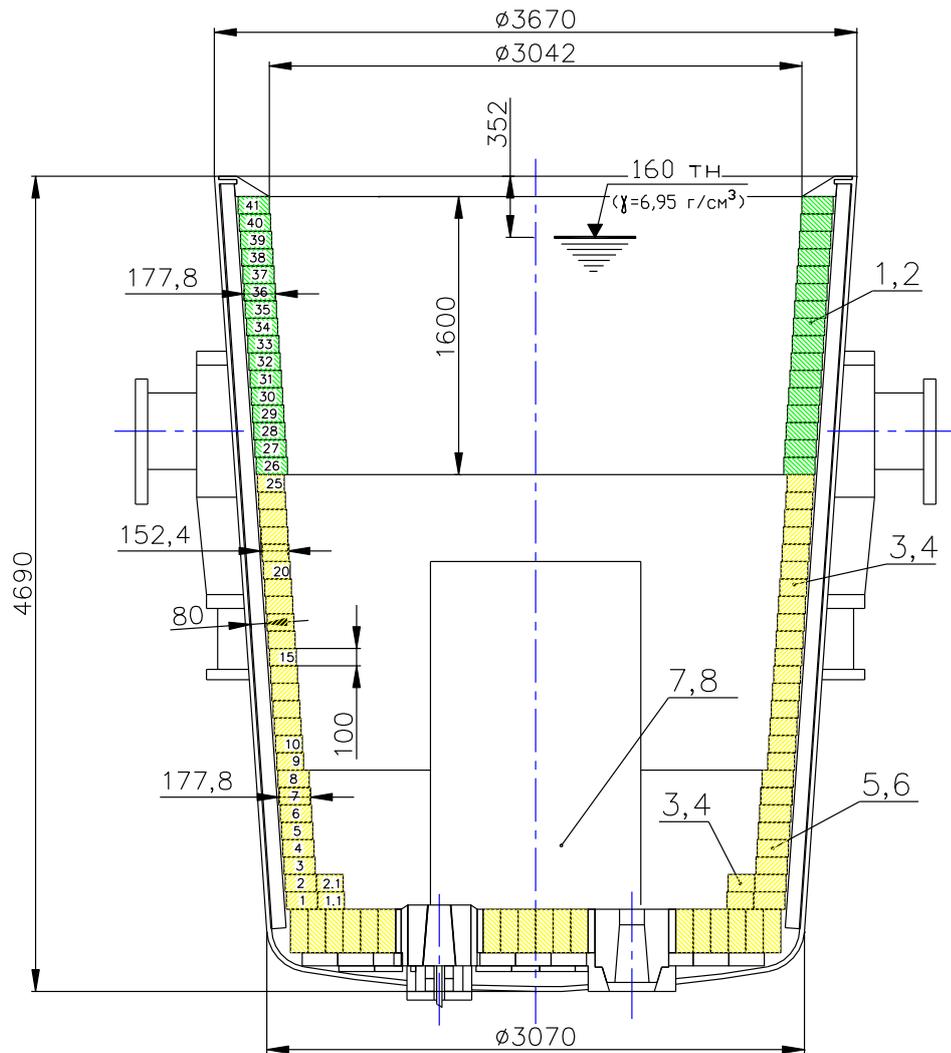
Надежность эксплуатации металлургических агрегатов непереносимое условие нормальной работы сталеплавильных цехов – в большей степени зависит от стойкости огнеупорной футеровки.

В работах [6-8] показано, что стойкость футеровки конвертеров может достигать 30 тысяч плавов. Такие высокие стойкости обеспечиваются за счет высокого качества применяемых огнеупорных материалов, стабильностью технологического процесса и, как следствие, незначительным перепадам температуры эксплуатации (200-300°С), комплексным уходом за футеровкой и созданием надежного шлакового гарнисажа, который обеспечивает защиту огнеупорных изделий [9].

В отличие от конвертеров, футеровка сталеразливочных ковшей и циркуляционных вакууматоров находятся в более жестких условиях эксплуатации.

В конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» принята следующая схема футеровки сталеразливочного ковша (рис. 1.1). Емкость сталеразливочного ковша составляет 160 тонн.

Футеровка сталеразливочного ковша выполнена из формата mini keys и учитывает особенности эксплуатации сталеразливочного ковша в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК»:



1, 2 – периклазоуглеродистые изделия; 3-8 – алюмопериклазоуглеродистые изделия

Рисунок 1.1 – Схема футеровки сталеразливочного ковша в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

- высота шлакового пояса 1400 мм, что позволяет уменьшить повышенный износ футеровки при колебании уровня металла от плавки к плавке;
- бойное место на днище в зоне падения струи металла при сливе из конвертера, позволяет повисить надежность эксплуатации;
- проект предполагает 1 ремонт шлакового пояса (14 рядов), который осуществляется во время промежуточного ремонта.

Футеровка выполнена по следующей схеме:

- шлаковый пояс (периклазоуглеродистые изделия с добавлением антиокислителя);

- стены (шпинельноуглеродистые изделия, изготовленные из качественного периклаза и алюмосодержащего сырья с применением спекающихся добавок и чешуйчатого графита);
- усиление стен (бойная зона - шпинельноуглеродистые изделия, изготовленные из качественного периклаза и алюмосодержащего сырья, с применением спекающихся добавок и чешуйчатого графита);
- днище (шпинельноуглеродистые изделия, изготовленные из качественного периклаза и алюмосодержащего сырья, с применением спекающихся добавок и чешуйчатого графита);
- усиление днища (бойная зона - шпинельноуглеродистые изделия, изготовленные из качественного периклаза и алюмосодержащего сырья, с применением спекающихся добавок и чешуйчатого графита);
- защитное кольцо (шпинельноуглеродистые изделия, изготовленные из качественного периклаза и алюмосодержащего сырья, с применением спекающихся добавок и чешуйчатого графита).

Средняя стойкость футеровки сталеразливочных ковшей составляет 55-80 плавов в зависимости от поставщика огнеупорных изделий [10].

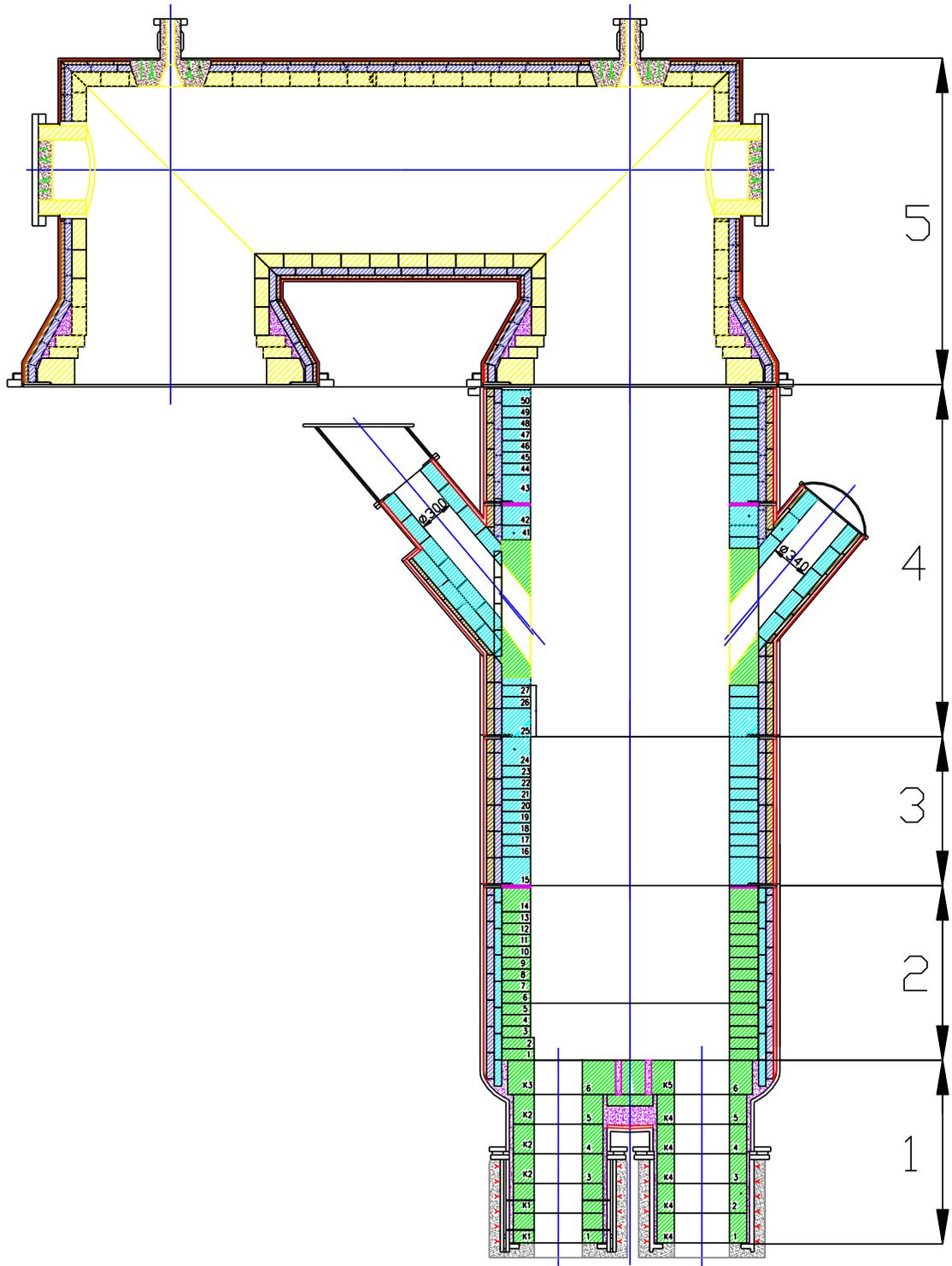
В конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» принята следующая схема футеровки циркуляционных вакууматоров (рис. 1.2).

Стойкость принятой схемы составляет 100-120 плавов по патрубкам (зона №1), 200-240 плавов по нижней части (зона №2), 800-1000 плавов по средней части (зона №3), 2500-3000 плавов по верхней части (зона №4) и более 3000 плавов по газоходу (зона №5).

Огнеупорная кладка вакууматора состоит из трёх слоёв: 1 – теплоизоляционный; 2 – арматурный или контрольный; 3 – рабочая футеровка. Патрубки имеют внутреннюю и наружную футеровку.

При кладке теплоизоляционного слоя используются силикат – кальциевые плиты с низкой теплопроводностью. Арматурная футеровка нижней части вакуум – камеры состоит из двух слоёв. Первый (наружный) выполняется из шамотных изделий, второй (внутренний) - из периклазохромитовых огнеупоров. Арматурная

футеровка средней, верхней и района ввода горелки также состоит из двух слоёв и выполняется шамотными изделиями, как импортного, так и отечественного производства.



1 – зона патрубков; 2 – зона нижней части стен; 3 – средняя часть вакуум – камеры; 4 – верхняя часть вакуум – камеры; 5 – газоохладитель

Рисунок 1.2 – Схема футеровки вакуум – камеры в конвертерном цехе
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Рабочая футеровка стен выполняется из импортных периклазохромитовых огнеупоров, в качестве основного компонента в которых, используются плавленые огнеупорные материалы или спеченные при температурах около 1800 °С.

Наружную футеровку съёмных патрубков выполняют из корундового или корундопериклазошпинелидного наливного бетона. Внутреннюю футеровку выполняют из огнеупорных колец, склеенных из периклазохромитовых изделий. Во внутренней футеровке впускного патрубка имеются 12 отверстий для ввода трубок подачи аргона, которые распределены в двух кольцах по шесть отверстий в каждом кольце. Зазор между внутренней футеровкой и металлоконструкцией заполняется огнеупорными массами корундового состава.

В настоящее время стоит задача увеличения стойкости огнеупорных изделий на агрегатах ковшовой обработки - вакууматоре и сталеразливочном ковше.

Рассмотрим существующие методы повышения стойкости футеровки указанных агрегатов.

1.2 Типы огнеупорных изделий, условия их эксплуатации и способы повышения стойкости футеровки сталеразливочного ковша

Условия эксплуатации футеровки сталеразливочных ковшей определяются технологией производства стали, сортаментом выплавляемого металла и коэффициентом использования основного металлургического оборудования [5].

Перенесение операций раскисления, десульфурации, легирования, регулирования формы и удаления неметаллических включений из сталеплавильного агрегата в сталеразливочный ковш позволяет сохранить производительность сталеплавильных агрегатов, при условии увеличения продолжительности обработки жидкого металла, но усложняет условия службы футеровки сталеразливочных ковшей и выдвигает дополнительные требования к материалу огнеупорной футеровки – отсутствие взаимодействия с вводимыми в расплавленный металл реагентами [5].

Интенсивность воздействия всех разрушающих факторов и, прежде всего, химического взаимодействия, определяется температурой металла сливаемого в

сталеразливочный ковш. В зависимости от технологических факторов, температура сливаемого в сталеразливочный ковш металла может составлять 1530-1700°C, а в некоторых случаях и выше [5, 11, 12].

Время воздействия рассматриваемых выше факторов определяется, в основном, продолжительностью пребывания металла в ковше, которое составляет 150-300 минут [5, 11, 12].

Условия эксплуатации ковша обуславливают резкий нагрев и охлаждение огнеупорной футеровки. Разница температур наливаемого металла и подогретой до 800 °С футеровки сталеразливочного ковша может составлять 700-900 °С [5].

Из описанных выше условий эксплуатации ковшей вытекает комплекс требований к рабочим свойствам огнеупоров, включающих хорошую устойчивость против коррозионного и эрозионного разрушения расплавленным металлом и шлаком, достаточную термостойкость, отсутствие химического взаимодействия с реагентами, вводимыми в металл в процессе ковшовой обработки, отсутствие значительной усадки при различных температурах эксплуатации [5].

Износ огнеупорных изделий в сталеразливочном ковше неравномерный. Наибольший износ отмечается в стеновых изделиях над продувочными пробками, в шлаковом поясе и в зоне ударного воздействия струи металла при его сливе из конвертера. Износ стеновых огнеупорных изделий, находящихся в зоне металла и на периферийных участках днища незначителен [11].

Исходя из условий эксплуатации сталеразливочных ковшей на большинстве металлургических заводов России и зарубежья принята, следующая схема футеровки (рис. 1.3) [13-42].

Шлаковый пояс выполняется высотой 1,0-1,5 м из периклазоуглеродистых изделий, что позволяет агрессивному шлаку взаимодействовать только с огнеупорными изделиями, обладающими повышенным сопротивлением к коррозионному износу, несмотря на меняющийся уровень налива металла от плавки к плавке [13-42]. В зоне шлакового пояса необходимо применять огнеупоры основного состава на основе плавленного или спеченного периклаза. Для снижения смачиваемости огнеупора шлаком в его состав вводят графит высокой чистоты. Содер-

жание примесей (SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO) в огнеупорных изделиях шлакового пояса должно быть минимальным [31].

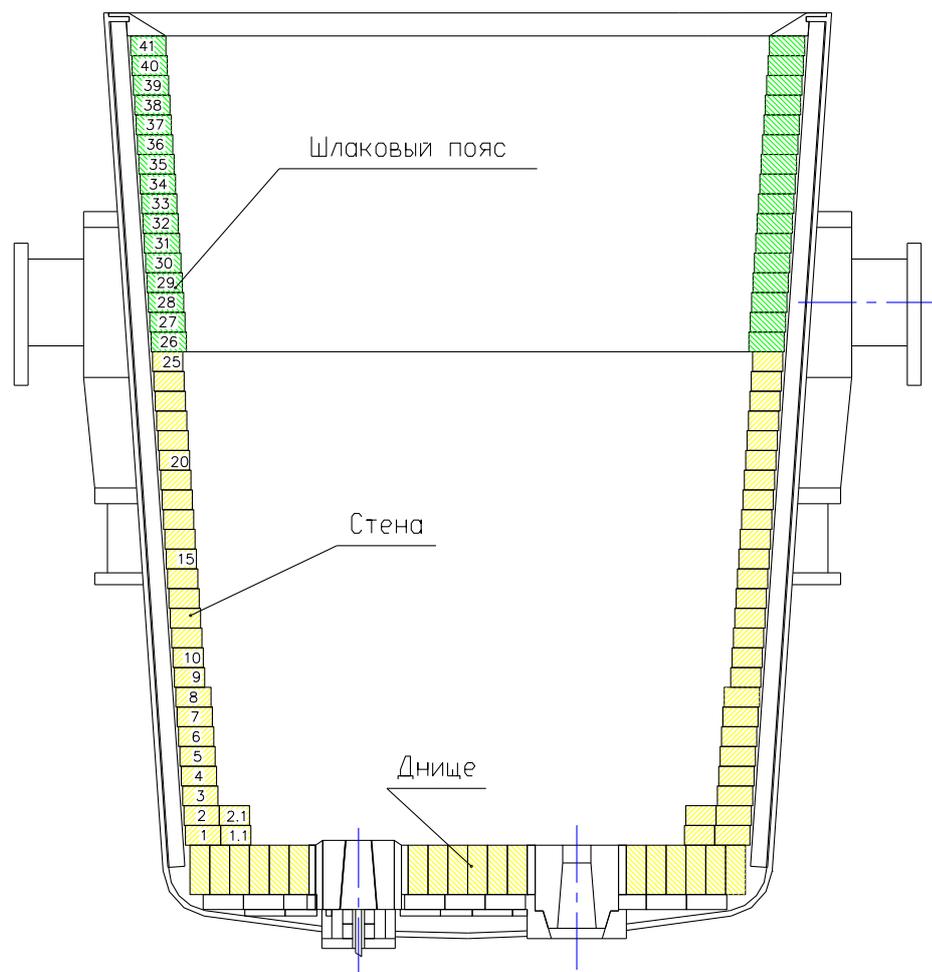


Рисунок 1.3 – Типичная схема футеровки сталеразливочного ковша

Стойкость шлакового пояса по разным источникам составляет 42-52 плавки [17, 19, 23].

Объектом обсуждения служат периклазоуглеродистые изделия, изготовленные с использованием нанотехнологий, в которых низкое содержание углерода достигнуто в результате использования графита с частицами наноразмера [12]. В Японии представлены огнеупорные изделия с содержанием углерода до 3% [43]. Данный тип изделий, с низким содержанием углерода, применяется для выплавки ультранизкоуглеродистых сталей.

В работе [44] показано, что в зоне контакта футеровки со шлаковым поясом (рис. 1.1, ряды 26-41) можно использовать различные типы корундовых бетонов. На производственных испытаниях стойкость опытной футеровки сталеразливоч-

ного ковша составила 1500 плавов при серийной стойкости 400 плавов. Высокая стойкость, по мнению авторов, связана с использованием в составе бетона шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$. При контакте зерна шпинели с расплавленным шлаком, который содержит ионы Mg^{2+} или Fe^{3+} , может происходить внедрение этих ионов в кристаллическую решетку. В результате вязкость шлака вокруг зерна шпинели повышается, а проникновение шлака замедляется. Таким образом, коррозионные реакции задерживаются или устраняются внутрикристаллитным внедрением ионов [44].

В основном футеровку днища сталеразливочного ковша выполняют из неформованных огнеупоров на основе корундовых бетонов [12-14, 16-18, 20, 23, 25-27, 34-36, 39, 41-42]. Однако, в работе [25] показана эффективность совместного применения формованных алюмопериклазоуглеродистых изделий и наливных масс в днище сталеразливочного ковша. Алюмопериклазоуглеродистые изделия устанавливаются в зону падения струи металла, остальное пространство рабочей футеровки днища сталеразливочного ковша заполняется наливными бетонами.

Футеровку стен в зоне расплавленного металла (рис. 1.1, ряды 1-25) по данным [20, 23, 26, 27, 34, 36, 42] выполняют из неформованных огнеупоров на основе корундовых бетонов.

Широкое применение неформованных огнеупоров в футеровке сталеразливочного ковша обусловлено следующими причинами [26]:

- быстрота и простота изготовления;
- отсутствие швов;
- технологическая гибкость;
- возможность отказаться от гнездовых блоков;
- возможность локального ремонта нижней части стен, усиленной зоны, шлакового пояса;
- меньший расход огнеупоров;
- меньшие затраты на переработку отходов.

По данным [18, 45, 46] метод выполнения наливных футеровок с использованием высокоглиноземистых масс получил распространение в Западной Европе и Японии в последние два десятилетия.

Основным преимуществом наливных футеровок, принято считать высокую степень автоматизации процесса их изготовления с последующей подготовкой ковшей к эксплуатации, а также возможность периодического ремонта футеровки путем ее подливки после каждых 40-70 плавов [18]. Однако, как показывает практика, использование ковшей с наливными футеровками требует оснащения участка подготовки ковшей специальным оборудованием: смесителями для подготовки неформованных огнеупоров с точной дозировкой воды; шаблоном для формирования внутренней поверхности футеровки; виброустановками для уплотнения бетона; сушильными агрегатами для длительной (в течении нескольких суток) термообработки футеровки по заданному режиму. Кроме того, на участке должна поддерживаться плюсовая температура в зимнее время [18, 28].

Стойкость монолитной футеровки по разным источникам [20, 23, 26] составляет 550-760 плавов.

На некоторых металлургических предприятиях рабочую футеровку сталеразливочных ковшей выполняют из формованных алюмопериклазоуглеродистых изделий [13-19, 22, 24-26, 28, 29, 31-33, 35, 37, 38].

В работе [19] показано, что алюмопериклазовая шпинель упрочняет структуру огнеупоров и обладает высокой устойчивостью к расплавам металла и шлака, имеет более низкий коэффициент линейного расширения по сравнению с периклазом. Это придает изделиям повышенную устойчивость к термическим напряжениям, возникающим при приемке металла, после охлаждения футеровки сталеразливочных ковшей для проведения ремонтных работ и межплавочных простоев, снижает вероятность зарождения и распространения трещин, а также скалывания фрагментов футеровки.

Шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$ является стойким огнеупором. В смеси чистого оксида магния и оксида алюминия ниже $1900\text{ }^{\circ}C$ не образуется жидкой фазы [15].

Недостатком футеровки, выполненной из формованных изделий, является присутствие швов в кладке. Потребители формованных огнеупоров выдвигают жесткие требования к точности изготовления изделий (по толщине изделия $\pm 0,5$ мм), обусловленные размером шва, зависящего от отклонений по толщине производимых изделий [31].

По данным [12, 16, 26] реакция между эквимольными количествами MgO и Al_2O_3 вызывает значительное расширение огнеупорных изделий. На практике подбирается такой химический состав огнеупорных изделий, при котором расширение компенсируется уплотнением швов в кладке, что предотвращает проникновение жидкого металла.

В Китае большинство сталеразливочных ковшей футеруется шпинельными алюмопериклазоуглеродистыми изделиями, а в шлаковом поясе – периклазоуглеродистыми изделиями. При данной схеме футеровки достигается стойкость 120-300 плавов [12, 22, 25].

В зависимости от технологических возможностей металлургических заводов в сталеразливочных ковшах применяют различные типы огнеупорных изделий, которые представлены в таблице 1.1 [23].

Форма и размеры огнеупорных изделий имеют важное значение для стойкости футеровки сталеразливочного ковша. Изделия большой толщины сложны в изготовлении и имеют разноплотность по высоте. Их центральная часть имеет меньшую плотность, чем периферийная, что отрицательно влияет на общую стойкость футеровки [31].

Изделия формата mini-key имеют одинаковую плотность по всему сечению, поэтому их износ происходит равномерно, что позволяет увеличить стойкость футеровки сталеразливочного ковша на 15-20% [14, 16, 31, 32].

Одним из важных элементов, обеспечивающих надежную эксплуатацию сталеразливочных ковшей, является система фиксации футеровки в корпусе сталеразливочного ковша. На большинстве металлургических предприятий, для фиксации футеровки в ковшах с обратной конусностью, применяется стальной ограничительный пояс на торце корпуса ковша [47].

Таблица 1.1 - Качественные показатели огнеупорных изделий сталеразливочного ковша

| Показатели | Материал | | | | |
|--|-----------------|--|--|--|--|
| | MgO – C изделия | Al ₂ O ₃ – MgO – C изделия | Al ₂ O ₃ – MgO бетон | Al ₂ O ₃ – MgO – C изделия | Al ₂ O ₃ – MgO бетон |
| Зона футеровки | Шлаковый пояс | Стены | Стены | Днище | Днище |
| Массовая доля, % | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | - | 72,8 | 92,0 | 70,1 | 92,0 |
| MgO | 78,0 | 14,6 | 6,0 | 9,4 | 5,0 |
| SiC | - | 1,8 | - | 6,0 | - |
| C | 16,5 | 4,8 | - | 8,0 | - |
| Открытая пористость, % | 3,0 | 4,6 | 19,8 | 7,0 | 21,6 |
| Кажущаяся плотность, г/см ³ | 3,02 | 3,18 | 3,00 | 3,10 | 3,05 |
| Прочность при сжатии при 20° С, МПа | 51,8 | 68,5 | 72,1 | 64,2 | 97,4 |
| Постоянное линейное изменение, % | +0,3 | +1,2 | +1,21 | +1,0 | 0,94 |

В процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей, ограничительный пояс на АКП подвергается тепловому воздействию со стороны электрической дуги, воздействию шлака при удалении его из ковша после разливки и механическому воздействию со стороны футеровки, что приводит к деформации ограничительного пояса [47].

Для надежного крепления футеровки в сталеразливочном ковше, по данным [48], можно использовать в последнем ряду футеровки огнеупорное изделие клиновидной формы, которое надежно фиксирует футеровку.

В процессе службы, металлический кожух сталеразливочного ковша деформируется, уменьшается радиус ковша между цапфами и увеличивается в по-

перечном направлении, разница диаметров может достигать до 200 мм и более. Задачу по уменьшению деформации металлического кожуха, в работе [49] предлагают решить с помощью наварки ребер жесткости.

Основным направлением повышения эксплуатационных свойств огнеупорных материалов, используемых в рабочей зоне футеровки сталеразливочного ковша, является применение изделий на основе магнезиальноглиноземистой шпинели [50, 51].

По данным [27, 36, 39] наблюдается тенденция использования шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ в высокоглиноземистых бетонах.

Присутствие шпинели повышает стойкость к коррозионному воздействию шлака и сопротивлению растрескиванию высокоглиноземистого бетона [27]. По данным [27] повышение стойкости к разъеданию шлаком связано с тем, что шпинель в составе высокоглиноземистого бетона абсорбирует нежелательные ионы Mn^+ , Fe^+ и другие ионы из шлака в вакансии решетки, также шпинель с более высоким содержанием Al_2O_3 более эффективно абсорбирует CaO из шлака с образованием высокоогнеупорного гибонита ($CaO \cdot 6Al_2O_3$). В результате, шлак у межфазной поверхности обогащается диоксидом кремния, становится более вязким, теряет проникающую способность, что способствует значительному росту шлакоустойчивости высокоглиноземистого бетона на шпинельной основе [27]. В результате применения шпинельномагнезиальных бетонов стойкость футеровки повысилась в 4-5 раз по сравнению с обычными корундовыми бетонами [36].

В работе [52] показано, что коррозионная стойкость корундовых бетонов повышается с ростом содержания оксида магния, вне зависимости от фазовой формы Al_2O_3 .

Авторами [12, 46, 53] были проведены исследования по применению в шлаковом поясе сталеразливочного ковша периклазоуглеродистых изделий с низким содержанием углерода, которые показали, что ввод в структуру матрицы периклазоуглеродистых огнеупоров газовой сажи и гибридно-графитированной сажи с наночастицами позволил значительно повысить термостойкость. Действие гиб-

ридно-графитированной сажи проявилось также в повышении стойкости к окислению в высокотемпературном диапазоне [53].

Износ формованных огнеупорных изделий сталеразливочного ковша зависит от вещественного и зернового состава [54-56], которые обуславливают скорость его пропитки шлаком и металлом. Когда скорость растворения огнеупора шлаком мала, шлак по порам проникает в огнеупор и реагирует с ним. Результатом взаимодействия может быть увеличение содержания жидкой фазы в объеме огнеупора и образование новых фаз: твердых растворов или химических соединений. Пропитка огнеупоров внешними расплавами корродиентов способствует образованию зон со специфической структурой и свойствами. На границах зон могут возникать напряжения, приводящие к скалыванию зон. При этом разрушение огнеупора путем скалывания происходит при температурах значительно более низких, чем огнеупорность изделия [56].

Вещественный и зерновой состав, способы подготовки масс и технология производства огнеупорных изделий формируют микроструктуру изделий, одной из характеристик которой являются размеры пор и их распределение по размерам. В работах [55, 56] было показано, что хорошие показатели эксплуатационных свойств огнеупорного изделия достигаются при равномерном распределении пор размером не более 45 мкм.

На стойкость футеровки большое влияние оказывают качественные показатели огнеупорных изделий, которые зависят от технологии их изготовления, в том числе содержания и качества углерода; качества периклаза, включая размер кристаллов; содержания оксида магния и иных фаз; качества связующего; а также физико-химических свойств огнеупорных изделий [57, 58].

Петрографические исследования огнеупорных изделий, применяемых в футеровке сталеразливочных ковшей ОАО «ЕВРАЗ НТМК» были выполнены на кафедре «Химическая технология керамики и огнеупоров» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). Типичный состав исследуемых формованных огнеупорных изделий представлен в таблице 1.2 [58, 59].

Таблица 1.2 – Качественные показатели огнеупорных изделий сталеразливочного ковша

| Зона применения материала | Предел прочности при сжатии, МПа. | Плотность, г/см ³ | Кажущаяся пористость, % | MgO, % | Al ₂ O ₃ , % | C, % | CaO, % | SiO ₂ , % |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------|------------------------------------|-------|--------|----------------------|
| Шлаковый пояс | 30-40 | ≥ 2,5 | ≤ 4,0 | 70-80 | - | 10-15 | - | - |
| Стена, днище | 35-50 | ≥ 3,0 | ≤ 10 | 20-30 | 50-60 | 5-10 | - | - |
| Боевое усиление | 40-55 | ≥ 3,0 | ≤ 10 | 8-15 | 70-80 | 5-10 | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 |

Вещественный состав минеральной части огнеупорных изделий определяли с помощью рентгеновской спектроскопии. Фазовый состав представлен корундом (α -Al₂O₃), имеющим ромбоэдрическую решетку; периклазом (MgO) и алюмосиликатами различного состава, приближающимися к муллиту (2SiO₂·3Al₂O₃). Невысокое содержание периклаза (до 15 масс.%), компенсируется его высоким качеством. Используется чистый периклаз. Используемый α -Al₂O₃ имеет меньший размер кристаллов или высокое количество примесей. Скорее всего, при изготовлении огнеупорных изделий использован спеченный боксит или смесь боксита и корунда [58, 59].

Зерновой состав изделий следующий [58, 59]: более 3 мм (10-15 %); более 2 мм отсутствуют; более 1 мм (35-40 %); менее 1 мм (45-55 %).

Петрографические исследования изучаемых огнеупорных изделий, также выполненные в УрФУ, показали, что минеральная часть образца состоит из плавленного нормального корунда с содержанием Al₂O₃ не менее 95 масс.% и высококачественного спеченного периклаза с размерами кристалла 250-500 мкм с содержанием MgO не менее 97%.

В качестве различных примесей в составе огнеупорных изделий присутствуют монтчеллит и двухкальциевый силикат, общим количеством не более 2%.

Используемый углерод представлен природным чешуйчатым дисперсным (40-120 мкм) углеродом в количестве 7-9 масс.%.

Огнеупорные изделия изготовлены на синтетическом жидком органическом связующем (3-4 масс.%) с высоким коксовым остатком.

В качестве антиоксиданта в изделиях использована смесь металлических порошков алюминия (2-3 % размером 10-50 мкм) и кремния (1-2 % размером менее 30 мкм).

Изделия имеют структуру, характерную при изготовлении на гидравлическом прессе при высоком давлении прессования на жидком связующем, либо с предварительным подогревом всех исходных компонентов, т.к. связка плотно окружает зерна периклаза, в некоторых случаях, заполняя поры в отдельных зернах.

Итоговые результаты исследований, проведенных в УрФУ, представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Вещественный состав стеновых огнеупорных изделий

| Название | Формула | Наличие в образце, масс. % |
|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Периклаз | MgO | 20,0-24,0 |
| Монтичеллит | CaO·MgO·SiO ₂ | 0,5 |
| Двухкальциевый силикат | 2CaO·SiO ₂ | 0,2 |
| Корунд | Al ₂ O ₃ | 51,0-57,0 |
| Тиалит | TiO ₂ | 2,0 |
| Углерод | C | 8,0 |
| Алюминий | Al | 3,0 (10-50 мкм) |
| Кремний или силумин | Si | 1,0-2,0 |
| Органическое вещество | C _m H _n и др. | 3,5-4,5 |

Таким образом, определены физико-химические свойства изделий, фазовый вещественный и зерновой составы, микроструктура и поровая структура изделий, а также оценена стойкость изделий сталеразливочных ковшей в условиях службы кислородно-конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

Основной износ огнеупорных изделий (около 2/3) осуществляется химическим путем - растворением шлаком [55].

Для повышения стойкости футеровки используют различные магниевые содержащие шлакообразующие добавки [60-65].

Шлак для уменьшения химического воздействия на футеровку должен находиться в области насыщения MgO [63, 64]. Это подтверждается практическими расчетами и теоретической предпосылкой известного положения химической термодинамики об отсутствии взаимодействия на поверхности раздела двух фаз в случае равенства концентраций диффундирующего компонента и концентрации насыщения [64].

В процессе слива металла, шлак образует на поверхности рабочего слоя футеровки стойкое гарнисажное покрытие [63, 64].

Гарнисажное покрытие, формируемое на рабочем слое футеровки, решает несколько задач: частично блокирует доступ кислорода воздуха к огнеупору, замедляя процесс окисления углерода в период перемещения ковша без металла и во время его нахождения на стенде разогрева между плавками; замедляет процесс остывания футеровки и принимает воздействие повышения температуры в момент заполнения ковша металлом [63, 64].

Оптимальное содержание MgO в шлаке, полученное во время промышленных испытаний [60-65] соответствует значениям 8-10%.

Однако для уменьшения химического воздействия на футеровку шлак должен находиться в области насыщения MgO [63]. Насыщение зависит от содержания основных компонентов шлака CaO , SiO_2 , Al_2O_3 [66]. Поэтому полученные значения насыщения MgO в шлаке при его содержании 8-10% не являются надежными.

1.3 Типы огнеупорных изделий, условия их эксплуатации на вакууматоре и способы повышения стойкости футеровки вакуум – камеры

Одним из способов вакуумной обработки является циркуляционное вакуумирование. Данный способ был основан на предположении фирмы «Heraeus» (Ханау, ФРГ). Принцип был реализован на заводе фирмы «Ruhrstahl AG» и получил название как процесс RH, или процесс циркуляционного вакуумирования [67].

В вакуумной камере установки РН имеются две футерованные огнеупорными материалами трубы (патрубки), по одной из которых металл затекает в вакуумную камеру, а по другой вытекает. Когда из вакуум – камеры начинают выкачивать газ, под действием атмосферного давления расплавленная сталь поднимается в вакуумную камеру на барометрическую высоту 1,48 м, одновременно в один из патрубков (впускной) подается газ, пузыри которого, разрыхляя металл, снижают его плотность в трубке, вызывая тем самым всасывание дополнительного количества металла, повышая его уровень в вакуум – камере. По достижении определенного уровня, металл вытекает через второй, сливной патрубок [1-3, 67].
 Схема работы вакуум – камеры представлена на рисунке 1.4.

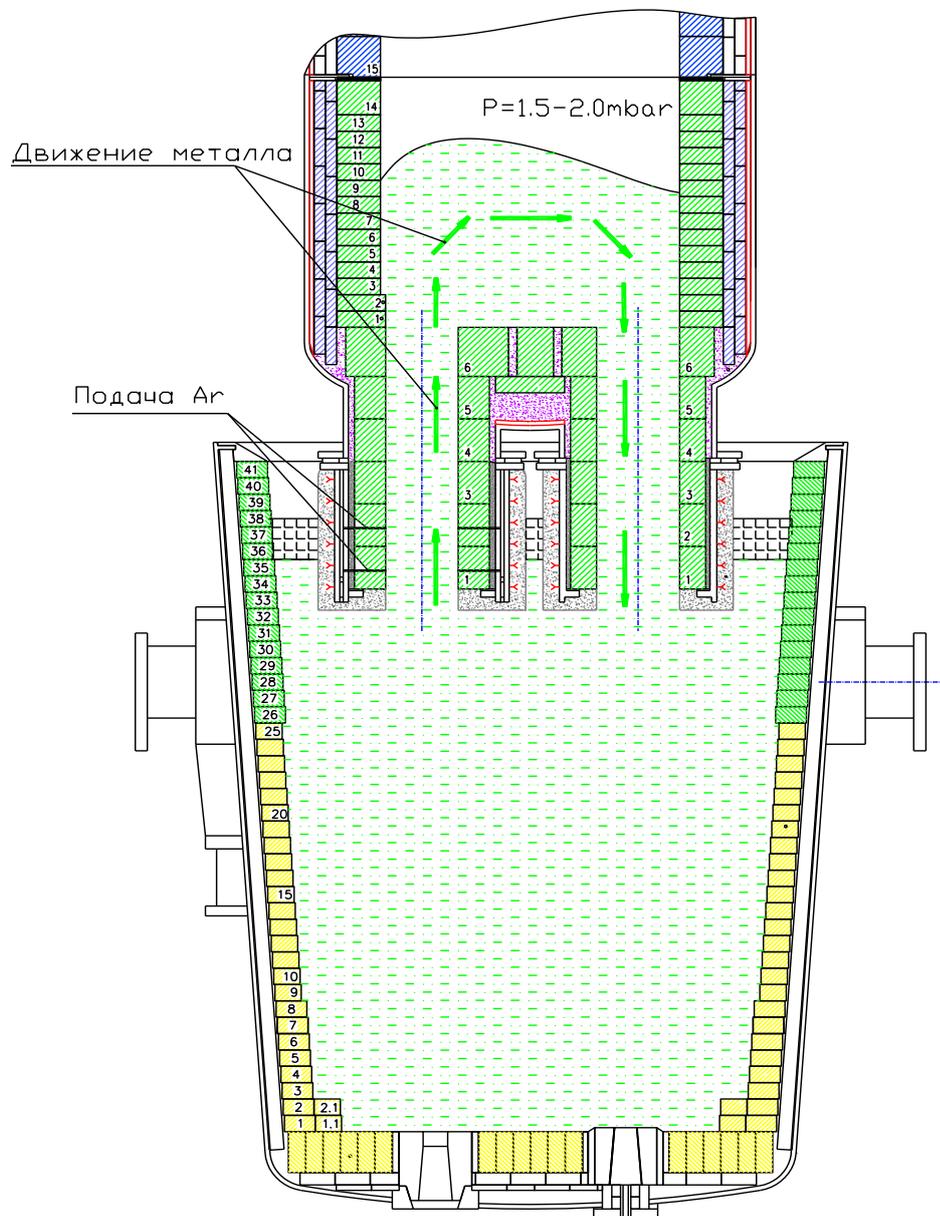


Рисунок 1.4 – Схема работы вакуум-камеры циркуляционного вакууматора

Футеровка вакуум – камеры изнашивается неравномерно. Стойкость футеровки газохода составляет более 3000 плавов, верхней части вакуум – камеры более 1500 плавов, средней части 800-1500 плавов, нижней части 50-300 плавов [26, 68-74].

В наиболее жестких условиях работы находятся погружные патрубки вакуум – камеры, которые подвергаются коррозионному и эрозионному воздействию расплава шлака и металла [75].

При выборе огнеупоров для циркуляционных вакууматоров, необходимо учитывать не только структуру огнеупоров и их взаимодействие с корродиентами, как в случае с футеровкой сталеразливочного ковша, но и устойчивость к воздействию низких парциальных давлений, которые возникают в процессе обработки металла вакуумом [55].

Исходя из условий эксплуатации, в футеровке вакуум – камеры используют следующие огнеупоры: внутренняя футеровка патрубков и вакуум – камеры выполнена из периклазохромитовых огнеупоров [26, 73, 69-92]. Наружная футеровка патрубков выполняется из корундовых бетонов [26, 73, 77, 82, 87].

В большинстве случаев в вакуум – камере, также как и в сталеразливочных ковшах, используют дифференцированную футеровку. Например, по данным [26, 73, 75, 82] во внутренней, рабочей футеровке патрубков, где присутствуют наиболее жесткие условия эксплуатации, целесообразно использовать огнеупоры высокого качества с прямой связью между периклазом и хромитом. В нижней части стен можно использовать менее качественный обожженный периклазохромитовый огнеупор.

Наиболее дорогие огнеупорные изделия используются в нижней части вакуум – камеры, поэтому целесообразно повышать стойкость футеровки в данной зоне.

В данном направлении проводится много исследований, направленных на изучение и подбор рационального состава огнеупоров и совершенствование конструкции футеровки.

Согласно данным [93], при изменении схемы расположения и увеличения с 5 до 6 в одном контуре количества подводящих транспортирующий газ сопел привело к уменьшению износа внутренней рабочей футеровки патрубка. Это достигается за счет взаимно противоположного расположения сопел.

Результаты исследований на гидравлической модели позволили разработать сопло нового типа (рис. 1.5) [94]. Благодаря новому контуру отверстия выхода газа в устье сопла, удалось, во-первых, снизить минимальный расход газа, необходимый для защиты сопла от закупоривания, до 20 литров в минуту; во-вторых, увеличить максимально допустимый расход газа более, чем до 200 литров в минуту без появления настелей на стенках вакуум – камеры.

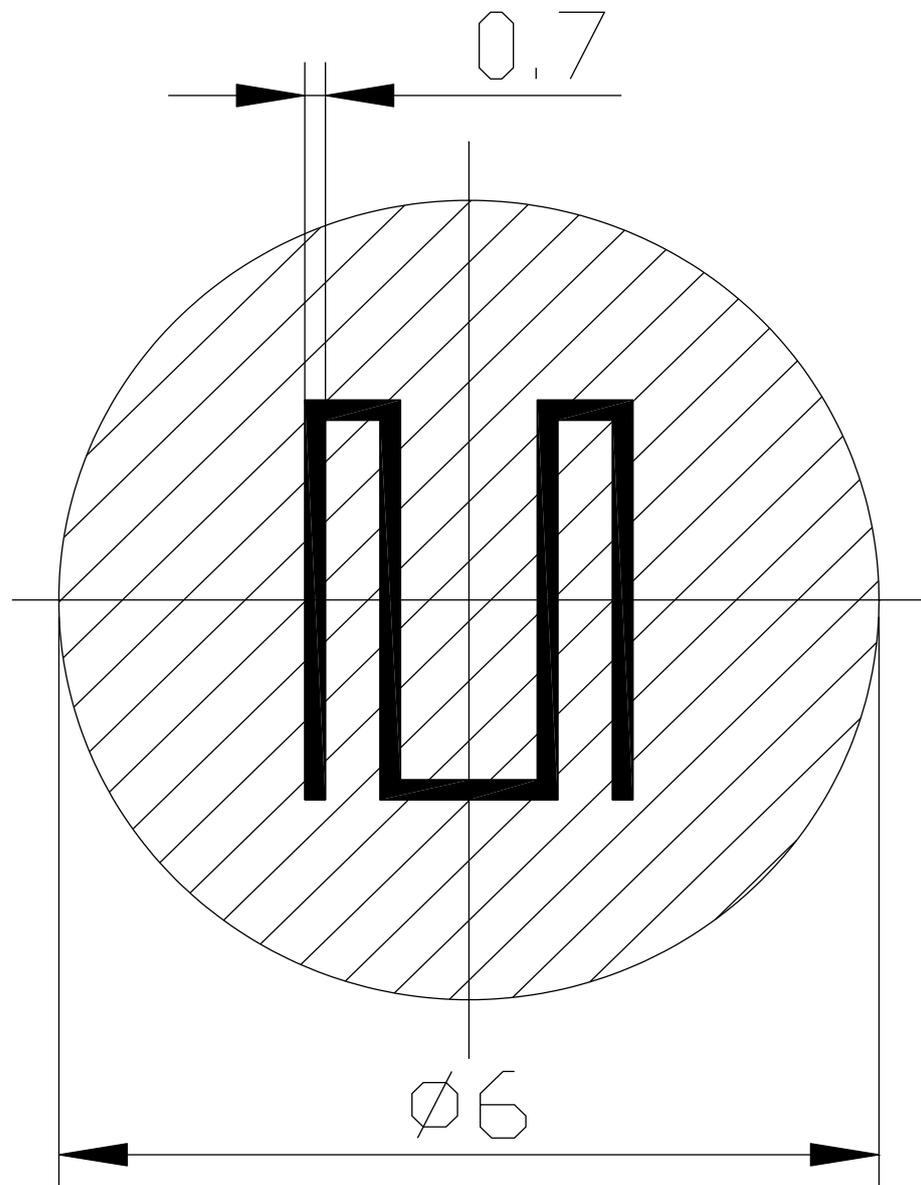


Рисунок 1.5 – Сопло нового типа с щелевым отверстием для выхода газа

Специальная конструкция устья щелевого сопла, ширина которого составляет 0,3-0,7 мм; имеет следующие преимущества [94]:

- жидкий металл даже при отсутствии подачи газа, не может проникнуть в щель сопла, и поэтому, подмораживание расплава у устья сопла, возникающее при отсутствии подачи газа, исчезает за несколько минут;
- газовые пузырьки, отделяющиеся от устья сопел имеют меньший размер; при цилиндрическом сопле наблюдается быстрый распад выходящего газового потока на отдельные пузырьки, иногда довольно крупных размеров, а перед щелевым соплом образуется вытянутое облако пузырьков, которое состоит из большого количества отдельных мелких пузырьков.

На ОАО «Магнитогорский металлургический завод» (ММК) при увеличении количества сопел с 6 до 12 и оснащение автономной регулировкой расхода аргона позволило увеличить срок их службы и повысить стойкость футеровки до 155 плавов [68].

В работе [92] выполнен анализ напряжений, возникающих в футеровке в результате ее теплового расширения и установлено, что причиной возникновения высоких напряжений является недостаточный размер температурных компенсационных швов в футеровке днища вакуум – камеры. Увеличение размеров компенсационных швов в футеровке на промышленном агрегате позволило полностью исключить случаи внепланового вывода вакууматора из работы по причине разрушения огнеупорных изделий в днище вакуум – камеры.

Несмотря на то, что традиционными огнеупорами для рабочей футеровки вакуум – камеры считаются периклазохромитовые изделия, постоянно ведутся поиски альтернативных огнеупоров. Например, применение в рабочей зоне футеровки периклазоуглеродистых и периклазоитриевых изделий [76, 77, 81-84].

Однако, периклазоуглеродистые изделия не могут конкурировать с периклазохромитовыми изделиями с прямой связью, т.к. непосредственное выгорание углерода во время предварительного нагрева ведет к росту обезуглероженного слоя, который легко пропитывается шлаком при контакте с ним. Также повышенному износу способствует удаление углеродистой связки. Поскольку защитный слой по

границам периклазовых зерен отсутствует, шлак свободно просачивается в обезуглероженную зону через поры или вдоль внутризеренных включений и разрушает кристаллы периклаза. Интенсивное перемешивание металла в вакуум – камере усиливает эффект вымывания, который ускоряет горячую эрозию [76].

По данным [81, 84] повышенный износ периклазоуглеродистых изделий в футеровке вакуум – камеры, также связан с окислением углерода и отслаиванием обезуглероженного слоя.

В Японии проводились испытания огнеупорных изделий на основе оксида магния и оксида иттрия ($MgO - Y_2O_3$). Стойкость $MgO - Y_2O_3$ изделий соответствовала стойкости $MgO - Cr_2O_3$. Исследования минерального и петрографического состава огнеупора показали, что глубина пропитки изделия шлаком незначительна и составляет 50 мм. Однако, недостатком $MgO - Y_2O_3$ изделий являлось то, что в огнеупорах после службы, были обнаружены трещины, образование которых, связывают с термическим растрескиванием [95, 96].

Периклазохромитовые изделия условно можно разделить на две группы, в соответствии с глубиной реакции между периклазом и хромовой рудой [26, 68, 69, 77, 82]:

- изделия с прямой связью между периклазом и хромитом;
- изделия на основе предварительного химического взаимодействия сырья, из плавленных зерен.

В работе [70] сопоставлялась структура периклазохромитовых изделий с их удельным износом. Показано, что максимальная стойкость отмечается у изделий, в которых присутствует высокое содержание хромшпинелида. Минимальная стойкость отмечается у изделий, в структуре которых присутствуют силикатные пленки вокруг кристаллов периклаза.

Авторами [78] проведено сравнительное исследование поровой структуры огнеупоров и их удельной пропитки шлаком. Сопоставление структуры всех исследованных материалов обнаруживает тенденцию к убыванию глубины пропитки с ростом суммарного объема тонких пор. Однако, существенно не само увеличение объема тонких пор, а то, что оно происходит одновременно с увеличением

содержания пор очень мелких размеров, радиусом менее 1 мкм. В порах меньшего радиуса вязкость инфильтрата скорее достигает величины, при которой его движение прекращается. Приведенные результаты порометрического анализа не дают количественного представления о степени изменения сечения пор и их дробление на более мелкие поры. В исследовании показана общая тенденция, что превосходство изделий по стойкости достигается за счет увеличения количества пор менее 1 мкм.

В работе [79] показано, что механизм износа периклазохромитовых огнеупоров в патрубке вакууматора выглядит следующим образом. В результате взаимодействия компонентов огнеупора с наиболее активными железистыми составляющими шлака, раскисления шлака и снижения его основности на рабочей поверхности футеровки образуется силикатный расплав монтичелитно-мервинитового состава, проникающий в глубь изделий (чему способствует вакуум), который растворяет мелкие зерна периклаза, хромшпинелида, что приводит к скалыванию огнеупора. Наличие в рабочих зонах двакальциевого силиката и последующих сколов, т.е. изделия изнашиваются за счет скалывания и смыва силикатными расплавами.

Анализ данных, проведенный в работе [80], показывает, что введение в шихту титансодержащей добавки, снижает открытую пористость спеченного хромконцентрата и повышает механическую прочность образцов. Выработаны рекомендации по введению титансодержащей добавки при производстве периклазошпинелидных изделий для гарантированного спекания хромконцентрата с низкой пористостью.

Несмотря на то, что в трудах [68-70, 77, 82] говорится о том, что изделия с прямой связью между периклазом и хромитом имеют большую стойкость, чем изделия, в которых применяется плавленный или обожженный при высокой температуре периклаз, в работе [97] показано, что замена плавленного периклазохромита на спеченный, в шихте магнезиальношпинелидных изделий не сказывается на уровне их технических свойств.

Из представленных литературных данных видно, что проведенные исследования периклазохромитовых огнеупоров не содержат детального изучения влияния структуры огнеупорных изделий на длительность их эксплуатации. Поэтому целесообразно провести петрографические исследования периклазохромитовых изделий, сопоставляя структуру огнеупорных изделий с удельным износом, с подбором рационального состава огнеупоров, применяемых в вакуум – камере.

По данным [55] 2/3 всего количества огнеупоров разрушается химическим путем – коррозией при их взаимодействии со шлаками, расплавами металлов, пылью, газами и другими корродиентами.

Изучение влияния воздействия шлака на стойкость периклазохромитовых огнеупоров проведено совместно с ОАО «Уральский институт металлов» (УИМ) [89-90]. Исследования проводились в лабораторных условиях с использованием промышленных и синтетических шлаков, и периклазохромитовых изделий различных поставщиков.

Статистическая обработка результатов лабораторных плавок показала, что влияние химического состава шлака на стойкость огнеупоров неоднозначна. Для уменьшения растрескивания огнеупоров необходимо вводить в шлак стабилизаторы, которыми могут быть оксиды железа, бора и алюминия. Отмечено целесообразность повышения содержания Al_2O_3 в шлаке [89-90], но не определены количественные значения. Также не выявлено конкретного влияния износа футеровки при различных содержаниях и соотношениях других ведущих оксидов. Полученные сведения имеют общий характер, и использовать их для практических целей не представляется возможным.

1.4 Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка комплекса мероприятий, направленного на повышение ресурса футеровки агрегатов ковшовой обработки стали, на основе улучшения дизайна футеровки, подбора рациональных структуры и свойств огнеупорных изделий, подбора рационального состава рафинировочного шлака.

В соответствии с поставленной целью основными задачами исследований являлись:

- определение основных факторов, влияющих на износ футеровки агрегатов ковшовой обработки;
- уточнение фактических температурных условий эксплуатации огнеупоров;
- разработка дизайна футеровки, направленного на повышение стойкости и надежности работы агрегатов ковшовой обработки стали;
- петрографические исследования периклазохромитовых изделий, оценка влияния структуры огнеупоров на их удельный износ, подбор рациональных параметров огнеупорных изделий, применяемых в вакуум-камере;
- исследования влияния состава шлака на износ футеровки сталеразливочного ковша (стальковша) и вакуум-камеры;
- выбор рациональных параметров шлака, наводимого на АКП, который обладает хорошими рафинирующими свойствами, является малоагрессивным к футеровке и формирует защитный гарнисаж;
- разработка предложений по составу и промышленные испытания новых шлакообразующих материалов.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ВАКУУМАТОРОВ И ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИКЛАЗОХРОМИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФУТЕРОВКЕ ВАКУУМ – КАМЕР

2.1 Технологические приемы повышения стойкости футеровки вакуум – камеры

С целью увеличения времени эксплуатации циркуляционных вакууматоров на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» был проведен ряд мероприятий, направленных на повышение стойкости футеровки вакуум – камеры:

1. Изменение геометрии патрубков вакуум камеры. Увеличение толщины внутренней футеровки патрубков со 150 до 180 мм, позволило повысить срок эксплуатации огнеупора и, следовательно, количество вакуумированных плавок. Футеровка сливного патрубка изнашивается меньше, чем впускного, поэтому для снижения затрат на приобретение огнеупоров было решено толщину футеровки сливного патрубка оставить без изменений 150 мм.

На данный момент вакуум – камеры футеруются: впускной патрубок – 180 мм, сливной патрубок – 150 мм [98, 99].

2. С целью повышения стойкости внутренней футеровки впускного патрубка, была изменена схема расположения сопел подачи нейтрального газа. Увеличено количество сопел с 10 до 12. Взаимно противоположное расположение форсунок снижает динамическое воздействие струи аргона на внутреннюю футеровку впускного патрубка [98, 99].

3. Рабочая футеровка впускного патрубка подвергается наиболее жестким условиям эксплуатации. При интенсивной обработке металла происходит разрушение верхнего кольца (в районе перемычки) с последующим его вымыванием и прекращением эксплуатации вакуум – камеры. Данный тип износа футеровки составлял около 15 % преждевременного вывода вакууматора на ремонт. Для исключения данного типа износа, было внедрено усиление в футеровку в районе пе-

ремычки (рис. 2.1). После внедрения новой схемы футеровки всплытие пятого кольца не наблюдалась [100]. Увеличение стойкости футеровки составило 12%.

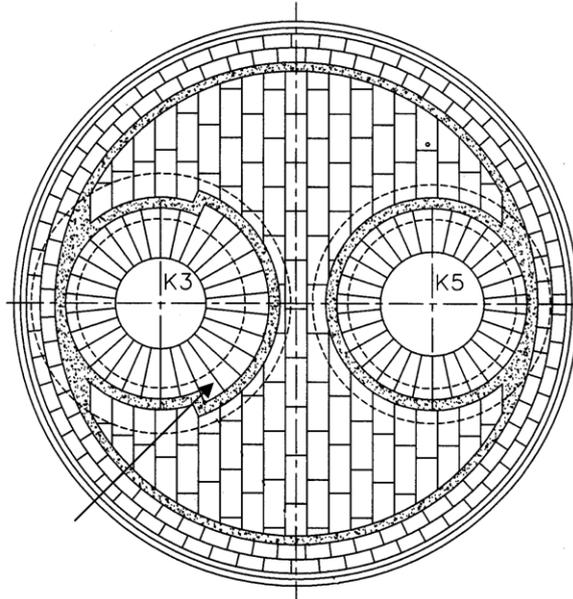


Рисунок 2.1 – Усиление впускного патрубка в районе перемычки (указано стрелкой)

4. Патрубки эксплуатируются в наиболее жестких условиях, подвергаясь, как агрессивному воздействию шлака с АКП, так и циклическому перепаду температур от 1600 до 700 °С. Metalлоконструкция патрубков и металлическая поддерживающая полочка испытывают термическое воздействие и деформацию. В результате происходит смещение огнеупорных колец, из которых выполнена внутренняя футеровка, и раскрытие горизонтальных швов. При обработке стали, жидкий металл просачивается в образовавшийся зазор в горизонтальных швах огнеупорной кладки впускного патрубка, между бетоном и рабочей футеровкой, 1-2 и 2-3 кольцами, локально (по окружности) разрушая футеровку. Разгары между швами огнеупорных колец не поддаются локальному горячему ремонту – торкретированию, поэтому вакуум – камеру на ремонт выводят преждевременно. Для предотвращения раскрытия горизонтальных швов необходимо исключить деформацию поддерживающей полочки. Например, наваркой ребер жесткости на металлоконструкцию патрубков с усилением поддерживающей полочки (рис. 2.2) В результате усиления металлоконструкции, уменьшилось раскрытие швов. Стойкость футеровки погружных патрубков повысилась [100, 101].

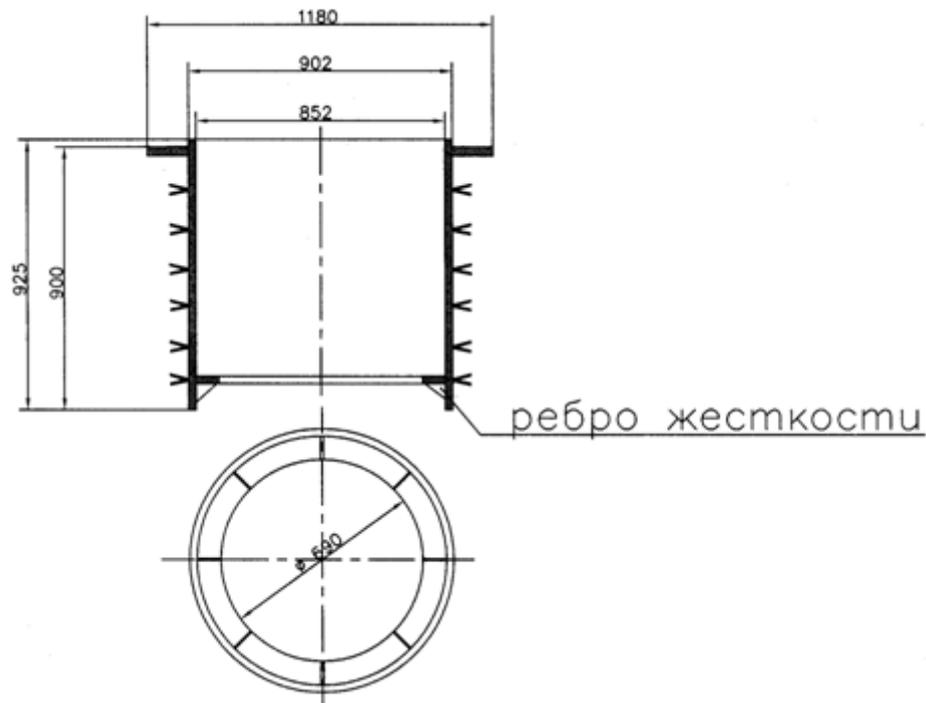


Рисунок 2.2 – Металлоконструкция патрубков с усилением поддерживающей полочки

Для снижения раскрытия швов предложена новая конструкция патрубков вакууматора. Особенность новой схемы футеровки заключается в том, что нижние огнеупорные кольца в патрубках вакууматора «Г» образной формы (рис. 2.3), а поддерживающая полочка выведена из наиболее изнашиваемой нижней торцевой части [102-104]. По данному предложению получен патент на полезную модель (Приложение А).

Вначале эксплуатации установки вакуумирования металла №2 в 2006 году столкнулись с проблемой недостаточного заглублением патрубков. При уровне налива металла менее 400 мм от края борта сталеразливочного ковша заглубление погружных патрубков вакуум – камеры в расплавленный металл недостаточно для проведения процесса вакуумирования стали. С целью устранения указанной проблемы нарастили огнеупорным бетоном торцы патрубков на 200 мм (рис. 2.4 а, б). Наличие дополнительного слоя огнеупорного бетона в торцевой части патрубков, повысило эффективность горячих ремонтов патрубков. Изменение схемы футеровки патрубков позволило улучшить параметры процесса вакуумирования металла и уменьшить трудоемкость проведения горячего ремонта патрубков [102].

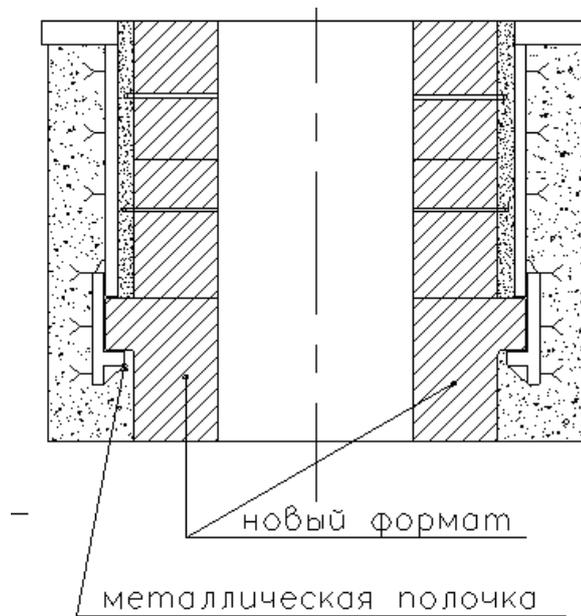
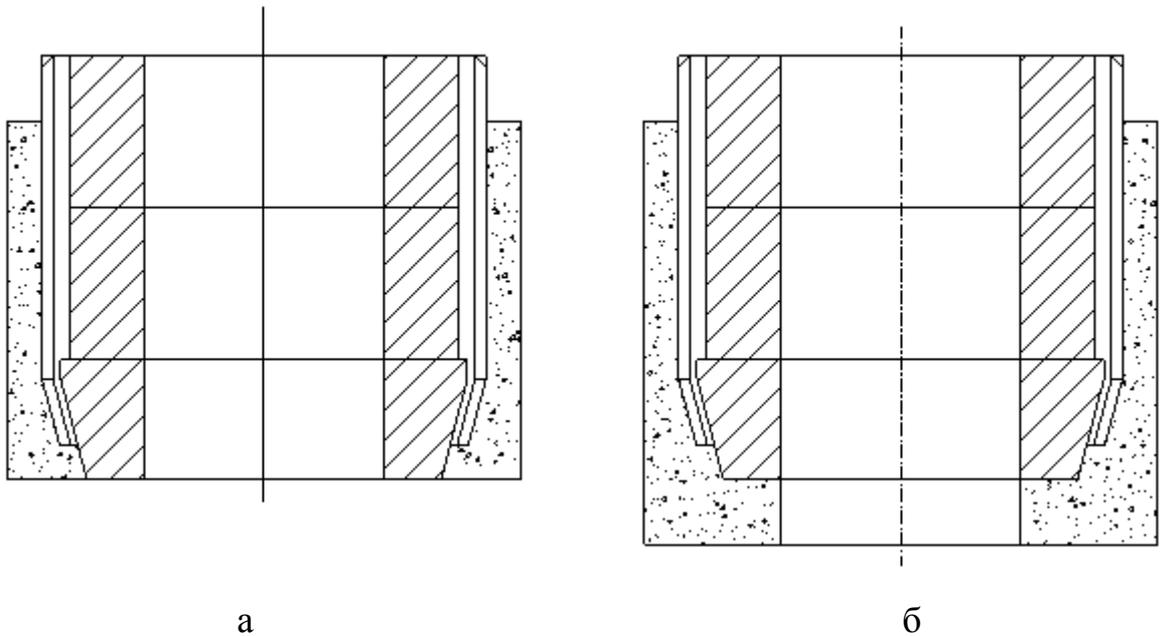


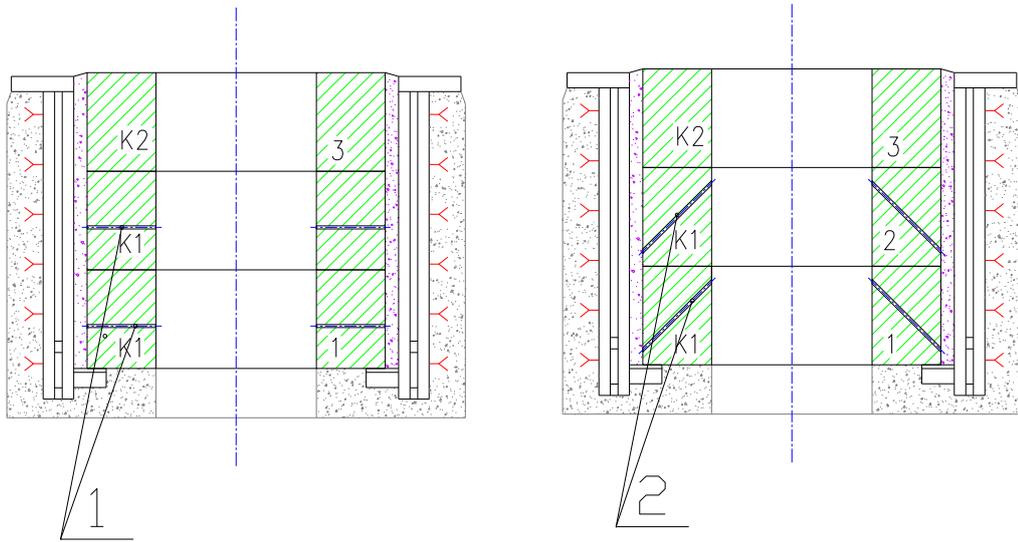
Рисунок 2.3 – Опытная схема футеровки патрубков вакуум – камер на РН №1.



а – первоначальная схема футеровки патрубков на РН №2; б – внедренная схема футеровки патрубков вакуум – камер на РН №2

Рисунок 2.4 – Опытная схема футеровки патрубков вакуум – камер на РН №2

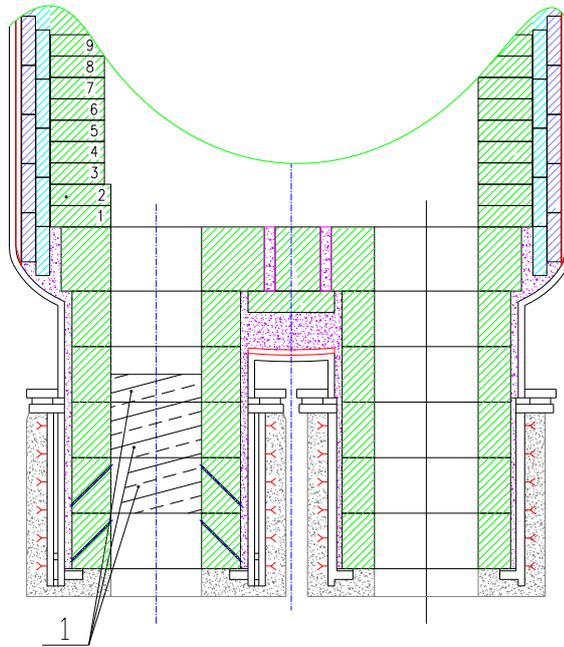
Для увеличения степени дегазации и повышения стойкости наиболее изнашиваемого места рабочей футеровки впускного патрубка вакуум – камеры был изменен угол ввода транспортирующего газа [104]. Схема патрубка с измененным углом отверстий в огнеупорных изделиях показана на рисунке 2.5.



1 – сопла расположены горизонтально; 2 – сопла расположены под углом
 Рисунок 2.5 – Существующая и опытная схемы футеровок

При внедрении мероприятия повысилась стойкость футеровки за счет того, что:

- зона барботажа металла перенесена к огнеупорным кольцам, которые находятся выше (рис. 2.6) и, как следствие исключается агрессивное воздействие барботажа на нижние кольца, где наблюдается наиболее интенсивный износ огнеупорных изделий;

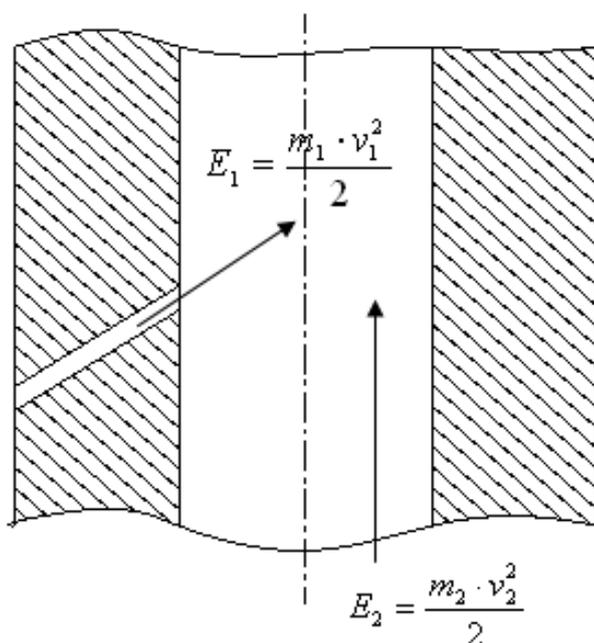


1 – зона барботажа

Рисунок 2.6 – Зона барботажа с наклонными соплами

- увеличится расстояние прохождения газа от сопел до огнеупорных колец (при наклоне сопел 45° расстояние увеличится в 1,4 раза), что позволит снизить кинетическое воздействие газа на футеровку впускного патрубка;

- при изменении угла наклона сопел часть кинетической энергии газа преобразуется в кинетическую энергию движения металла и придает ему дополнительную скорость, тем самым увеличивая скорость циркуляции газа, что, в свою очередь, позволит снизить время вакуумирования металла и повысить стойкость рабочей футеровки патрубков вакуум – камеры (рис. 2.7).



$$E = E_1 + E_2$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

E – общая кинетическая энергия; E_1 – кинетическая энергия вдуваемого газа; m_1 – масса вдуваемого газа; v_1 – скорость вдуваемого газа; E_2 – кинетическая энергия движущегося металла; m_2 – масса движущегося металла; v_2 – скорость металла; v – общая скорость металла и газа; m – общая масса металла и газа

Рисунок 2.7 – Расчет скорости циркуляции металла

Средняя достигнутая стойкость на первых опытных вакуум – камерах повысилась на 10% и составила 111, 5 плавков (на серийных изделиях стойкость составляет 102,0 пл.) [104].

Из рассмотренных примеров видно, что увеличение времени эксплуатации вакуум – камер на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» связано с конструктивными изменениями, как в металлоконструкции агрегата, так и в схеме футеровки.

С целью оценки дальнейшего повышения стойкости футеровки вакуум – камеры необходимо исследовать влияние технологических факторов на износ периклазохромитовых изделий в рабочей футеровке вакуум – камеры.

2.2 Изучение факторов, влияющих на износ внутренней рабочей футеровки погружных патрубков вакуум – камеры

Для определения наиболее значимых факторов, влияющих на скорость износа внутренней рабочей футеровки погружных патрубков, были выбраны параметры эксплуатации сорока законченных кампаний вакуум – камер, которые были зафутерованы огнеупорами одной и той же фирмы. При обработке параметров эксплуатации, исследовалась зависимость удельного износа огнеупоров от 8 факторов:

- среднее время вакуумирования, мин.;
- общее время обработки, мин.;
- среднее время обработки, мин.;
- процент плавов с остаточным давлением $< 0,3$ кПа в вакуум – камере во время вакуумирования металла, %;
- процент плавов с остаточным давлением от $0,3$ до $0,5$ кПа в вакуум – камере во время вакуумирования металла, %;
- процент плавов с остаточным давлением $> 0,5$ кПа в вакуум – камере во время вакуумирования металла, %;
- процент высокоуглеродистых (содержание углерода более $0,6$ %) марок сталей, %;
- процент среднеуглеродистых (содержание углерода от $0,2$ до $0,6$ %) марок сталей, %;

Из выше представленных факторов методом парных корреляций были выделены наиболее значимые [105-107]:

- среднее время вакуумирования, мин.;
- процент плавов с остаточным давлением $< 0,3$ кПа в вакуум – камере во время вакуумирования металла, %;

Далее, была рассчитана множественная регрессия с коэффициентом корреляции 0,67, характеризующая степень взаимного влияния рассматриваемых параметров.

Уравнение регрессии имеет следующий вид [105,106]:

$$Y = - 0,035 + 0,0641 \cdot X_1 + 0,0133 \cdot X_2, \quad (2.1)$$

где, X_1 - среднее время вакуумирования, мин.;

X_2 - процент плавов с остаточным давлением $< 0,3$ кПа в вакуум – камере во время вакуумирования металла, %.

Полученное уравнение показывает, что на удельный износ и, как следствие на время эксплуатации огнеупорной футеровки вакуум – камеры, влияют различные технологические факторы.

Подтверждено, что при увеличении времени воздействия расплавленного металла на футеровку погружных патрубков, удельный износ огнеупорных изделий повышается.

Огнеупорные изделия циркуляционных вакууматоров эксплуатируются в условиях обработки металла вакуумом, поэтому рассмотрели их устойчивость к воздействию низких парциальных давлений.

В условиях промышленного вакуума испарение огнеупоров идет как инконгруэнтная реакция [55]:

$$P_{общ} = P_M + P_{O_2}, \quad (2.2)$$

где, $P_{общ}$ – общее парциальное давление кислорода;

P_M – парциальное давление испаряющегося металла;

P_{O_2} – парциальное давление кислорода.

Продифференцировав уравнение (2.2) по p_{O_2} получили следующее уравнение:

$$\frac{\partial p_{общ}}{\partial p_{O_2}} = \frac{\partial p_M}{\partial p_{O_2}} + 1, \quad (2.3)$$

Анализ уравнения (2.3) позволил сделать вывод о том, что устойчивость огнеупоров в вакууме можно рассматривать как их стойкость к действию кислорода [88].

Для определения степени устойчивости оксида к кислороду воспользовались уравнением Герца – Ленгмюра [108].

$$J_{i,\max} = (2\pi M_i RT)^{1/2} D_{i,eq}, \quad (2.4)$$

где, $J_{i,\max}$ - поток i -го компонента, выраженный в (моль/см²·с);

$D_{i,eq}$ – давление i -го компонента при равновесном состоянии;

M_i – молекулярная масса i -го компонента;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

В условиях термодинамического равновесия равенство (2.4) выражает также максимальную скорость, при которой газообразные продукты покидают поверхность реагента.

Футеровка циркуляционных вакууматоров выполняется из магниевых изделий, поэтому рассмотрели устойчивость MgO при воздействии высокой температуры и вакуума:



Применяя закон действия масс к моновариантной системе в уравнении (2.5) и, предполагая, что активность фазы $MgO_{(мс)}$ равна единице, получили [88]:

$$\exp\left[-\Delta G^\circ / (RT)\right] = P_{Mg} \cdot P_{O_2}^{1/2}, \quad (2.6)$$

где, ΔG° – стандартное изменение энергии Гиббса реакции инконгруэнтного испарения;

P_{Mg} – парциальное давление Mg;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Из равенства (2.6) можно найти выражение потока магния (Mg), как функции парциального давления кислорода. Таким образом, согласно равенству (2.4) поток Mg может быть выражен следующим уравнением [108]:

$$J_{Mg} = \left(2\pi M_{Mg} RT\right)^{-1/2} P_{Mg}, \quad (2.7)$$

Подставляя равенство (2.6) в уравнение (2.7) и, выражая поток Mg в граммах потока оксида магния (MgO), для чего, учитывая, что моль Mg получается из моля MgO, и поток Mg умножали на молекулярную массу оксида магния [55]:

$$J_{MgO} = \left(1.596 \cdot 10^5 / T^{1/2}\right) M_{MgO} \left\{ \exp\left[-\Delta G^o / (RT)\right] / M_{Mg}^{1/2} \right\} (P_{O_2})^{-1/2}, \quad (2.8)$$

где, J_{MgO} – максимальный поток магния, выраженный в граммах оксида магния, (г/см²·час);

P_{O_2} – парциальное давление кислорода, атм.;

M_{MgO} , – молекулярная масса оксида магния;

M_{Mg} – молекулярная масса магния.

Уравнение (2.8) показывает математическое выражение испарения оксида в зависимости от парциального давления кислорода.

Согласно равенству (2.8) максимальный поток металлического магния при постоянной температуре изменяется как функция P_{O_2} . В случае, когда испарение оксида магния будет происходить при равнозначных условиях, можно установить следующую зависимость между потоками (моль/см²·с) [108]:

$$J_{Mg} = 2J_{O_2}, \quad (2.9)$$

Эта зависимость, выраженная в единицах измерения соответствующих равенству (2.4) и объединенная с законом действия масс даёт [108]:

$$P_{O_2} = \left[2 \cdot \exp(\Delta G^o / RT) \left(M_{Mg} / M_{O_2}\right)^{1/2}\right]^{2/3}, \quad (2.10)$$

При этом значении парциального давления кислорода поток испарения, описанный равенством (2.8), будет иметь максимально возможное значение J_C .

Нужно отметить, что равенство (2.8) точно определяет максимальный поток MgO только в условиях испарения. В других случаях данное равенство для определения J_{MgO} не работает в полной мере. Однако, поскольку MgO является единственным источником атомов Mg, в то время как O₂ присутствует и в других источниках, то равенство (2.8) остаётся приемлемым для получения кинетических

данных в области, где давление O_2 превзошло над значением P_{O_2} , определённым по равенству (2.10). Согласно этому, если в окружающей среде больше кислорода, как это случается в условиях промышленного вакуума, поток уменьшается, от значения J_C до величины, соответствующей новому парциальному давлению O_2 находящемуся в равновесии с металлической составляющей. Там, где P_{O_2} меньше, чем значение, данное равенством (2.10) необходимо различать J_{MgO} и J_{Mg} [108].

Максимальная скорость, при которой испаряется MgO соответствует J_C . В таких случаях равенство (2.8) не даст точного значения J_{MgO} , а величина, J_C остаётся более точной для максимальной скорости [108].

В таблице 2.1 приведены максимальные потоки испарения оксидов, рассчитанных для рабочих точек в условиях промышленного вакуума, при отсутствии ванны металла [55].

Таблица 2.1 – Максимальные потоки испарения оксидов в условиях промышленного вакуума

| Конденсированные фазы | SiO ₂ | MgO | Gr ₂ O ₃ | CaO | TiO ₂ | BeO | ZrO ₂ | Al ₂ O ₃ |
|---|---------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|
| $J_O, \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $3,1 \cdot 10^{-3}$ | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | $8,9 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$ | $1,2 \cdot 10^{-8}$ | $4,8 \cdot 10^{-8}$ |
| dJ_{ZrO_2} / dP_{O_2} | $1,6 \cdot 10^2$ | $3,5 \cdot 10$ | 5,4 | $2,5 \cdot 10^{-1}$ | $6,1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | 0 | $4 \cdot 10^{-4}$ |

Из приведенных данных следует, что ZrO₂ является наиболее устойчивым оксидом в условиях вакуума. Однако оксид циркония не может образовывать шпинельной связи с другими оксидами, поэтому на практике, в футеровках циркуляционных вакууматоров его не применяют.

Уравнение (2.1) показывает, что применение горячих ремонтов погружных патрубков способом торкретирования увеличивает время эксплуатации вакуум – камеры. В работах [16, 79, 100-102, 109, 110] показано, что проведение горячих ремонтов может существенно повысить стойкость футеровки циркуляционных вакууматоров.

С 2000 года на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» внедрен полусухой способ горячего ремонта патрубков, с использованием увлажненной магнезиальной торкрет-массы. Нанесение защитного слоя на практически гладкую внутреннюю поверхность футеровки патрубков не приводит к заметному эффекту, так как частицы плохо сцепляются с внутренней рабочей футеровкой патрубков. Нанесенный слой торкрет массы из-за непрочного сцепления легко смывается турбулентным потоком жидкого металла в ходе обработки последующей плавки. Опыт показывает, что зона перехода «огнеупорный бетон – огнеупорное изделие» в нижней части патрубка хорошо поддается торкретированию (рис. 2.8) Наблюдается четкая зависимость между частотой торкретирования и продолжительностью эксплуатации вакуум – камеры, т.е. своевременный уход за торцевой частью патрубков положительно сказывается на их общей стойкости [101, 102].

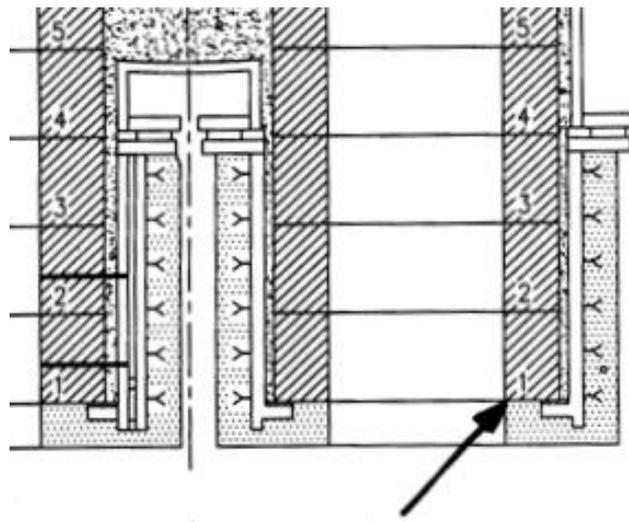


Рисунок 2.8 – Зона разрушения и торкретирования патрубков (указана стрелкой)

Уравнение (2.1) отражает влияние различных факторов на удельный износ футеровки циркуляционных вакууматоров и согласуется с теоретическими данными. Выше рассмотренные условия эксплуатации не отражают влияние показателей качества изделий. Поэтому изучили свойства огнеупорных изделий, применяемых в рабочей футеровке вакуум – камеры.

2.3 Исследование структуры периклазохромитовых изделий, применяемых в футеровке циркуляционных вакууматоров

Изучена зависимость удельного износа периклазохромитовых изделий в зависимости от их структуры. Были отобраны три вида опытных образцов огнеупоров (№1- 3), которые отличались по качественным показателям. Результаты представлены в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Качественные показатели изделий

| № образца | Массовая доля, % | | | | | | | Кажущаяся плотность, г/см ³ | Открытая пористость, % | Предел прочности при сжатии, Н/мм ² |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|---------|--|------------------------|--|
| | MgO | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Примеси | | | |
| 1 | 66,19 | 21,53 | 6,74 | 2,98 | 0,81 | 0,88 | 0,87 | 3,34 | 11,4 | 108,8 |
| 2 | 57,77 | 20,85 | 13,03 | 7,40 | 0,57 | 0,38 | 0,00 | 3,23 | 16,2 | 45,2 |
| 3 | 73,10 | 14,20 | нет данных | нет данных | 0,67 | 1,05 | 10,98 | - | 14,0 | 44,4 |

Таблица 2.3 – Стойкость и удельный износ огнеупоров

| № образца | Средняя стойкость, пл. | Впускной патрубок, мм/пл. | Сливной патрубок, мм/пл. |
|-----------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 102,3 | 1,08 | 0,70 |
| 2 | 84,6 | 1,79 | 0,75 |
| 3 | 54,0 | 3,12 | 0,75 |

Из данных, представленных в таблицах 2.2 и 2.3 видно, что изделия, имеющие прочность при сжатии не менее 70 Н/мм², кажущуюся пористость не более 13% и минимальное содержание оксида кремния не более 0,9 % в условиях эксплуатации циркуляционных вакууматоров показывают максимальную стойкость [107].

Также, данные таблиц 2.2 и 2.3 показывают, что удельный износ футеровки сливного патрубка не зависит от качественных показателей огнеупорных изделий. Качественные показатели огнеупорных изделий влияют на износ футеровки толь-

ко впускного патрубка. Именно здесь огнеупоры подвергаются наиболее жестким условиям службы [105]:

- дополнительному охлаждению поверхности изделий нейтральным газом в межплавочный период;
- значительной турбулентности металла, которая вызывает дополнительную эрозию кирпича.

Эти причины, в первую очередь, обуславливают повышенный износ огнеупоров впускного патрубка, и именно здесь, важную роль играет качество огнеупорных изделий.

Детальное изучение периклазохромитовых изделий было проведено в сотрудничестве с кафедрой «Химическая технология керамики и огнеупоров» УрФУ и ОАО «Комбинат «Магнезит». Проводилось комплексное исследование вещественного состава и микроструктуры образцов магнезиальношпинелидных изделий на электронном микроскопе Philips XL-30 [106].

Образец № 1.

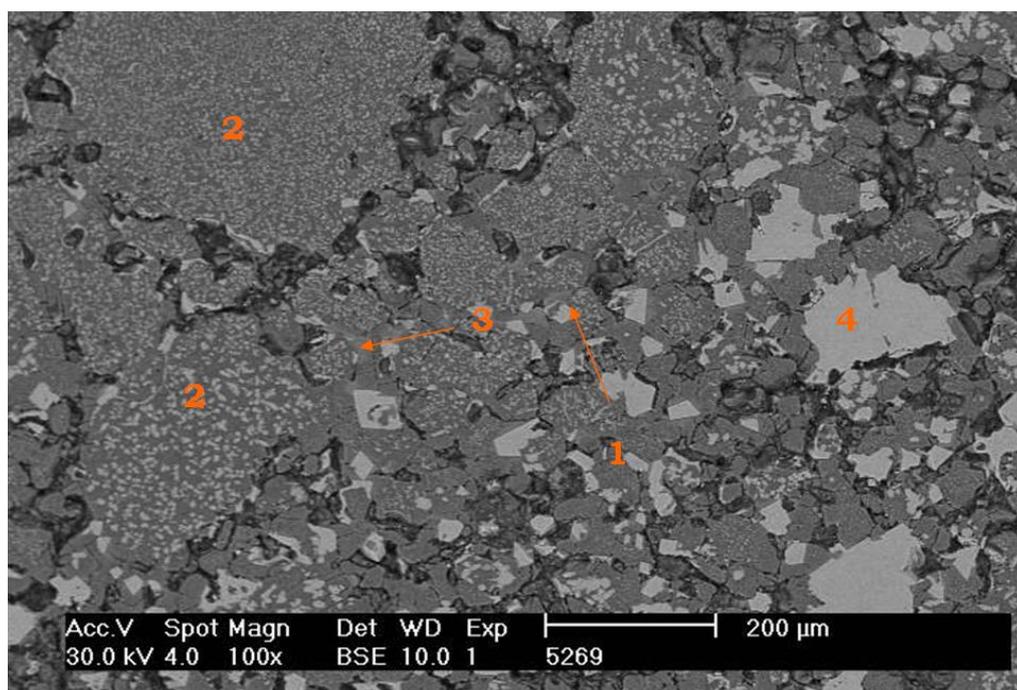
В образце огнеупора №1 микроструктура наименее измененной зоны сложена зернами плавленного периклазохромита размером 300-2400 мкм с преобладанием монокристаллического строения. В межкристаллическом пространстве силикаты представлены монтichelлитом и мервинитом, и присутствуют в виде округлых или заovalенных включений в основном размером 20-80 мкм. Периклазохромит равномерно насыщен крупными включениями вторичного хромшпинелида, размерами 10-30 мкм.

Тонкомолотая составляющая состоит из частиц плавленного периклазохромита размером 30-150 мкм. Зёрна хромита хорошо контактируют с другими частицами, образуя общий, хорошо спеченный, каркас. Между частицами присутствуют силикатные (монтichelлитные) пленки шириной до 10 мкм.

Связь зёрен периклазохромита и хромита с тонкомолотой составляющей хорошая, прямая.

Поры в тонкомолотой составляющей образца мелкие, изолированные или сообщающиеся, неправильной изометричной формы, размерами 40-80 мкм.

В целом образец имеет мелкопористую структуру с большим количеством мелких пор (рис. 2.9).



1 – хромшпинелид; 2 – периклазохромит; 3 – монтichelлит; 4 – хромит;
темные участки – поры

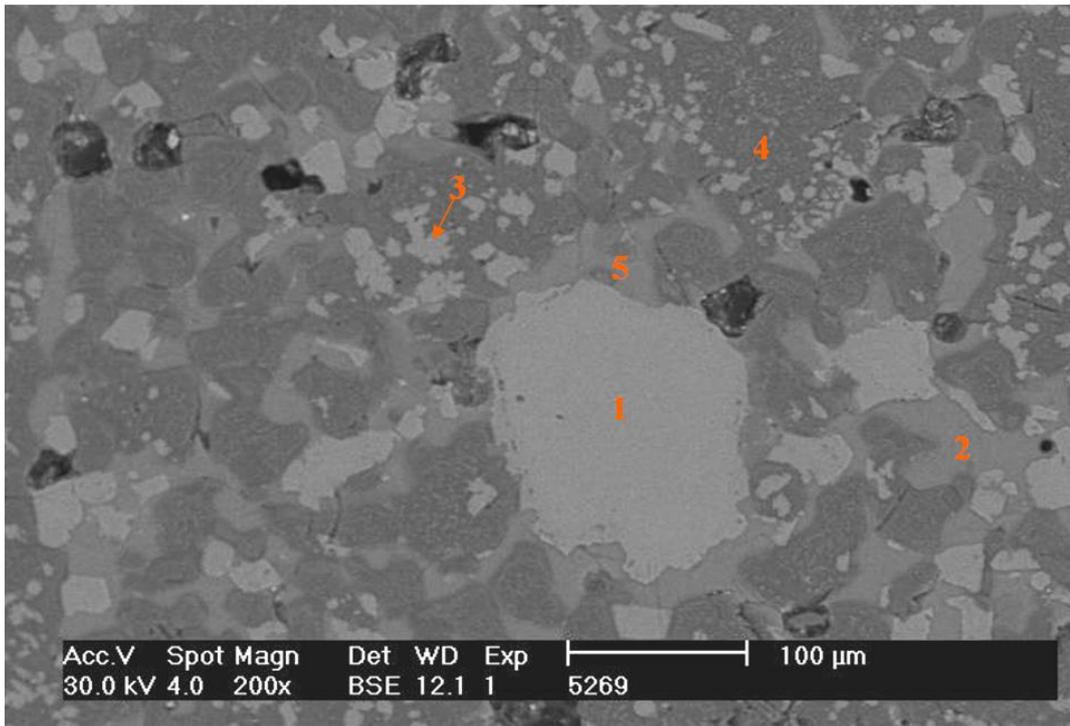
Рисунок 2.9 – Микроструктура наименее изменённой зоны изделия № 1

Между малоизменённой и рабочей зонами имеется зона с немного повышенной пористостью и, практически, со структурой, характерной для малоизменённой зоны. Поры в этой зоне трёх видов, с преобладанием первого и второго вида:

- мелкие, изолированные, неправильной изометричной формы, размером до 50 мкм;
- групповые, каналные шириной до 300 мкм (преобладают, до 200 мкм);
- крупные, неправильной формы, с ответвлениями, размером до 500 мкм.

Рабочая зона этого образца характеризуется более плотной микроструктурой за счет заполнения пор силикатами (рис. 2.10). Пропитка по поровому пространству составляет 20-25 мм.

Шлаковая корочка составляет 6-12 мм, в которой на расстоянии 1,0-2,5 мм наблюдались две трещины шириной 100-400 мкм параллельные рабочей поверхности. Минеральный состав представлен в основном магнезиоферритом с включениями мервинита, реже монтichelлита.



1 – хромит; 2 – мервинит; 3 – хромшпинелид; 4 – периклазохромит;
5 – монтичеллит; темные участки – поры

Рисунок 2.10 – Микроструктура рабочей зоны изделия № 1

Образец № 2.

Микроструктура наименее изменённой зоны образца № 2 представлена зернами спеченного периклазохромита в основном поликристаллического строения, с преобладающим размером 400-1600 мкм. Это является основным отличием от микроструктуры образца № 1. Микроструктура тонкомолотой составляющей и характер ее связи с зернами периклазохромита и хромита, аналогичен микроструктуре образца № 1 (рис. 2.11).

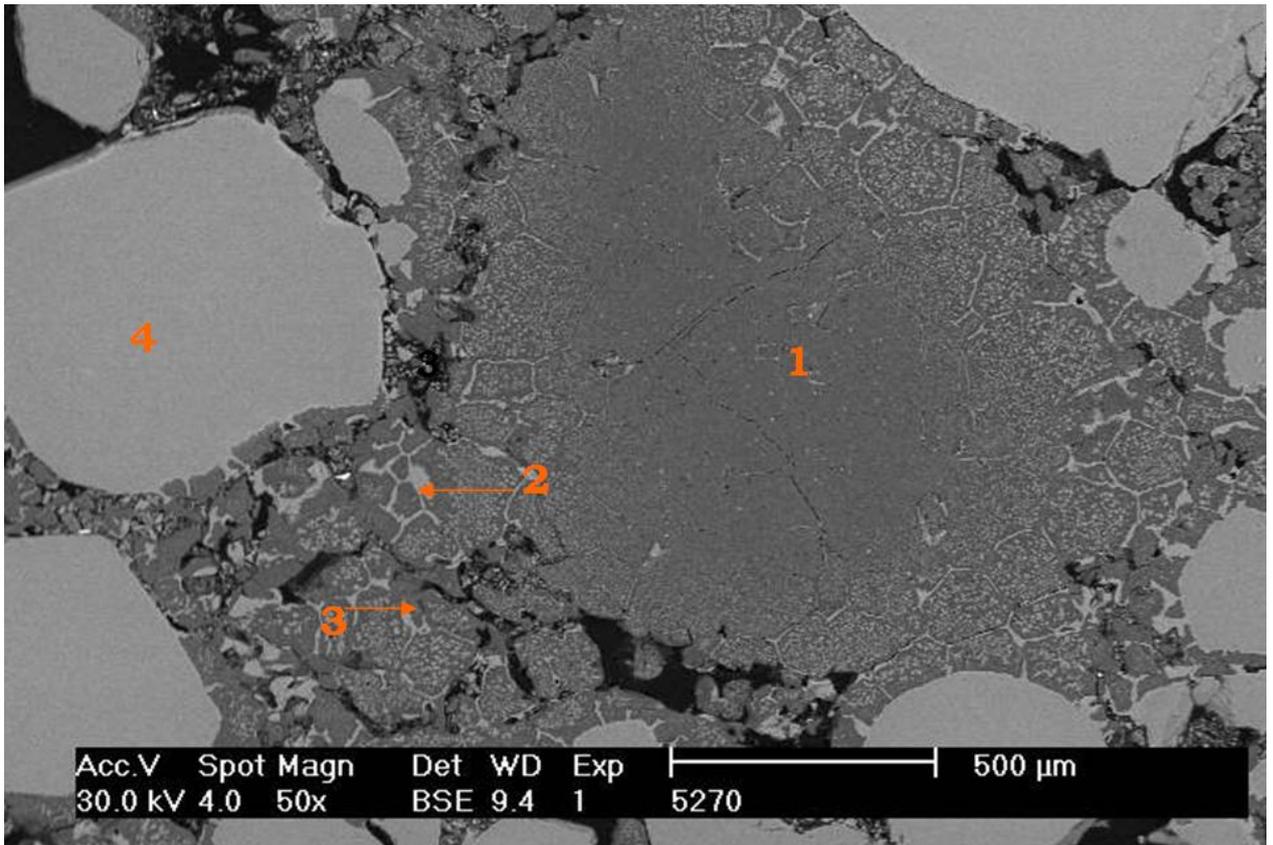
Поры в образце следующих видов:

- мелкие, изолированные или групповые, сообщающиеся, неровные, размерами 80-200 мкм;
- крупные, редкие, неправильной формы, отдельные, с ответвлениями, размером до 500 мкм.

Переходная зона выделена условно, по микроструктуре и по минеральному составу аналогична неизменной зоне.

Рабочая зона образца № 2 характеризуется более мощной шлаковой корочкой 11-17 мм, по сравнению со шлаковой корочкой образца № 1, и большими разме-

рами пор от 20-2200 мкм, которые заполнены силикатами, а так же спеканием компонентов зернистой и тонкомолотой составляющих (рис. 2.12).



1 – периклазохромит; 2 – хромшпинелид; 3 – монтичеллит; 4 – хромит;
темные участки – поры

Рисунок 2.11 – Микроструктура наименее изменённой зоны изделия № 2

От шлаковой корочки на расстоянии 1,8-2,5 мм и 7-9 мм наблюдаются трещины, ширина которых варьирует от 100 до 1200 мкм.

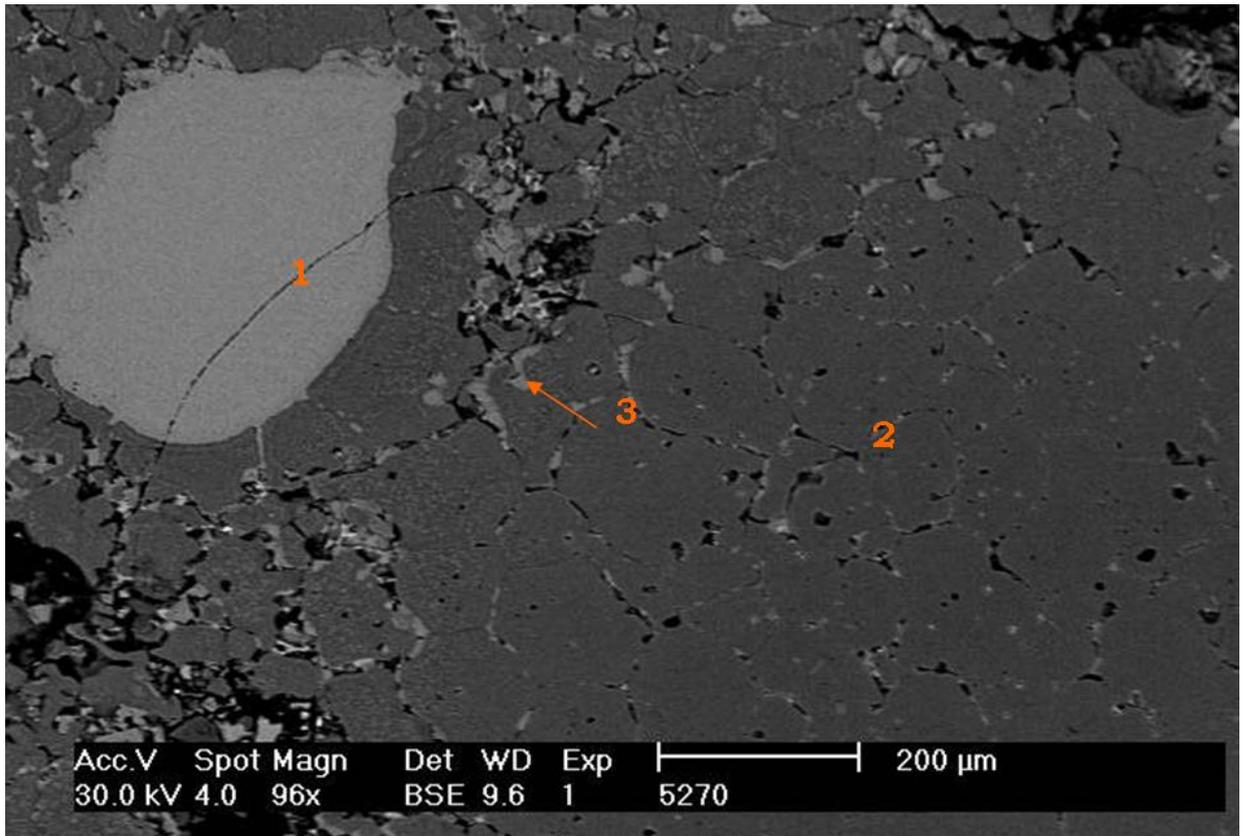
Образец № 3.

Микроструктура образца № 3 кардинально отличается от микроструктур образцов № 1 и 2.

Несмотря на то, что она состоит из плавленных зерен периклазохромита с преобладающим размером 400-1800 мкм и размером кристаллов 200-800 мкм, в зёрнах периклазохромита присутствуют округлые или заovalенные включения силикатов от 20 до 100 мкм, что немного превышает величину таких же включений в первых двух образцах.

Связь тонкомолотой составляющей между собой хорошая, прямая локальная, реже посредством хромшпинелидных или силикатных плёнок.

Связь зёрен хромита с тонкомолотой составляющей плохая, неудовлетворительная или отсутствует.



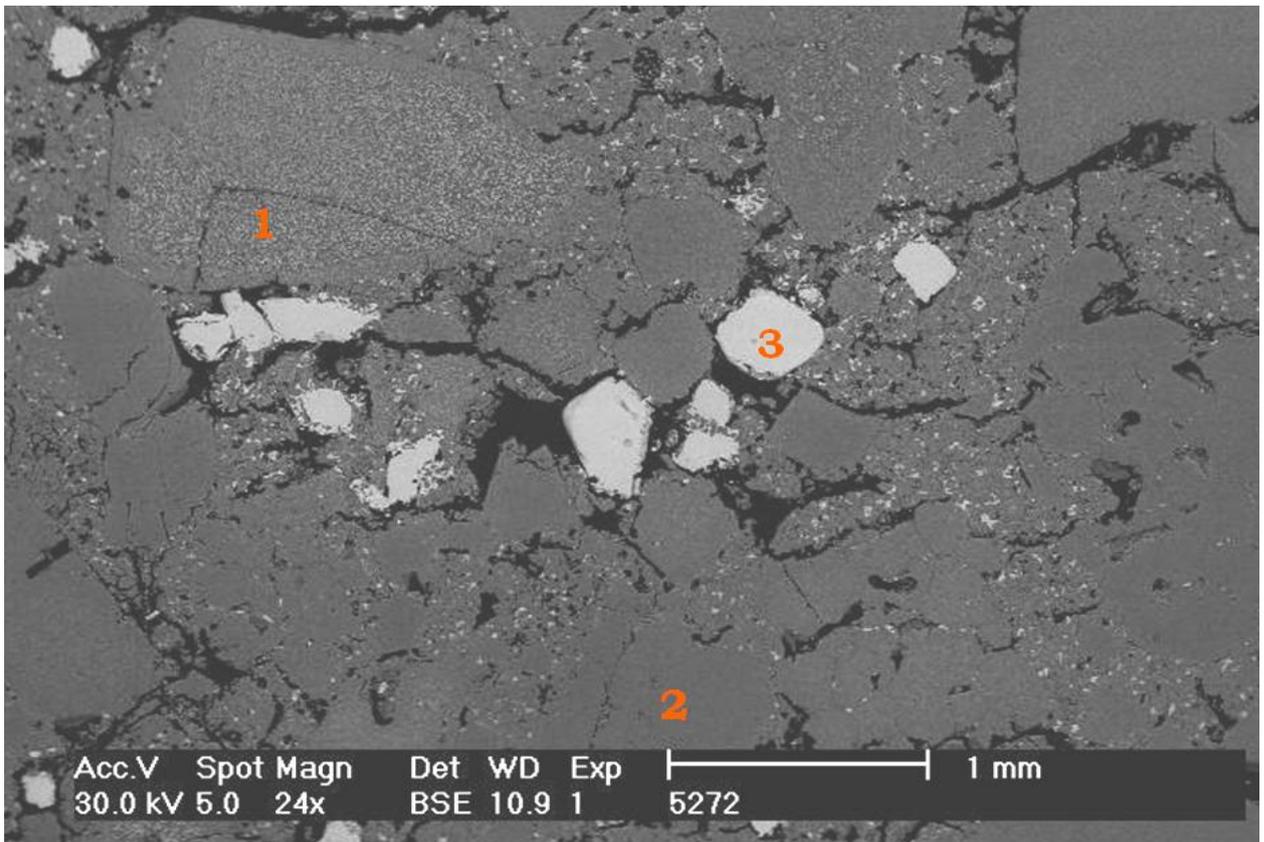
1 – хромит; 2 – периклазохромит; 3 – хромшпинелид; темные участки – поры
Рисунок 2.12 – Микроструктура рабочей зоны в изделии № 2

Связь зёрен периклазохромита с частицами тонкомолотой составляющей хорошая, прямая, мостовидная.

Поровое пространство абсолютно отличаются от образцов 1 и 2: мелких пор мало, крупных много (рис. 2.13).

Поры в образце четырех видов, с преобладанием третьего и четвертого видов:

- редкие, мелкие, изолированные, неправильной округлой формы, размером до 50 мкм, преобладают 10-30 мкм;
- групповые извивающиеся, сообщающиеся, шириной до 100 мкм, преобладают 20-50 мкм;
- крупные, неправильные, с ответвлениями, размером до 1800 мкм, преобладают 200-800 мкм;
- кольцевые, полукольцевые, вокруг зёрен хромита, шириной 40-200 мкм.



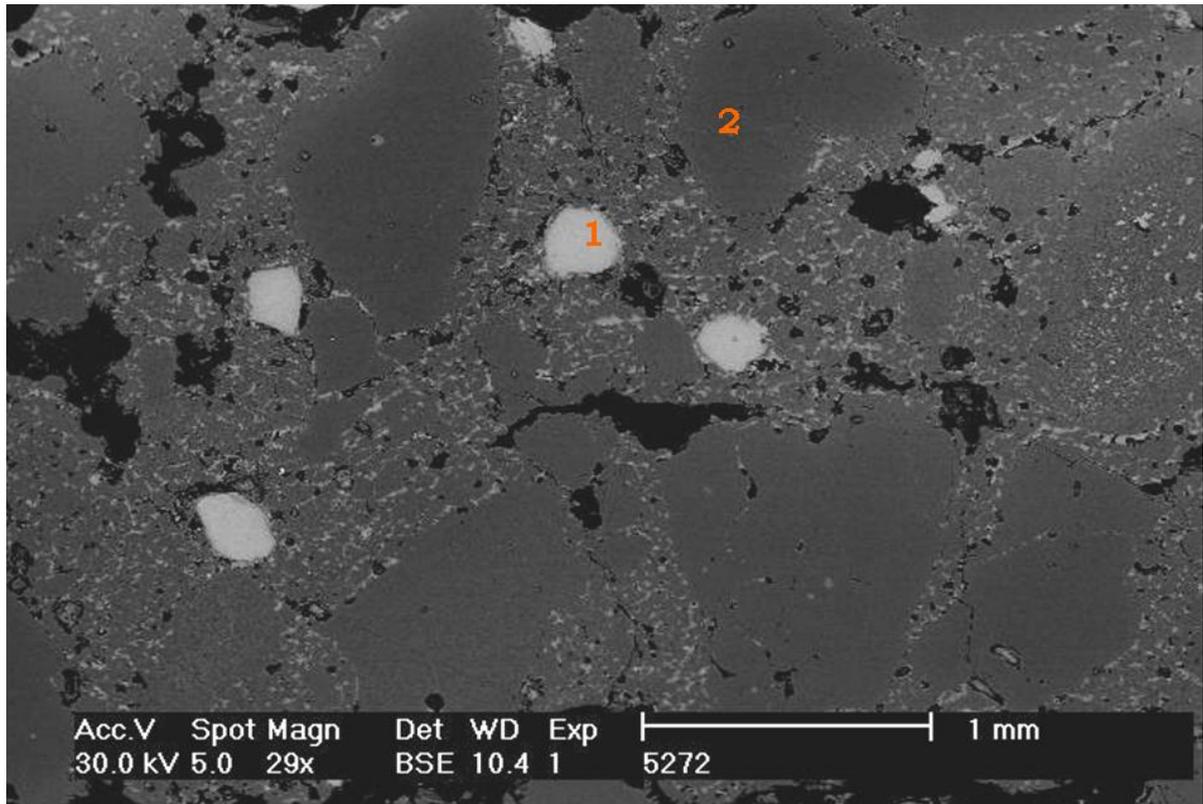
1 – периклазохромит; 2 – периклазохромит; 3 – хромит; темные участки – поры
Рисунок 2.13 – Микроструктура холодной зоны изделия № 3

Рабочая зона характеризуется двухслойной шлаковой корочкой мощностью 9-11 мм. Первый слой состоит из магнезиоферрита и феррохромита с включениями мервинита; второй слой, находящийся ближе к рабочей поверхности, состоит из феррохромита и мервинита. Поры в шлаковой корочке изолированные, неправильной округлой формы размером 40-3000 мкм, заполненные силикатами. Характерным для рабочей зоны образца № 3 является, мощное спекание локальными участками. Микроструктура неоднородна, наблюдаются крупные поры, которые понижают термостойкость и механическую прочность (рис. 2.14).

По проведенным петрографическим исследованиям, можно оценить состав шихты, из которой были изготовлены периклазохромитовые изделия (табл. 2.4) и минерально – фазовый состав (табл. 2.5).

В исследованном образце № 1 содержится хромит мелкой фракции 0,15-0 мм. Все зёрна периклазохромита, в основном монокристаллического строения, с очень крупными включениями хромшпинелида. В среднем размер включений 10-20 мкм, в редких случаях до 250 мкм. В тонкомолотой составляющей зёр-

на хромита хорошо спечены и тесно контактируют с другими частицами. Изделие имеет микропористую структуру (средний размер пор от 40 до 80 мкм).



1 – хромит; 2 – периклазохромит; темные участки – поры
Рисунок 2.14 – Микроструктура рабочей зоны изделия № 3

Таблица 2.4 – Ориентировочный состав шихты для периклазохромитовых изделий

| № | Состав шихты | Содержание, объём. % | | |
|---|--|----------------------|-------------|-------------|
| | | Образец № 1 | Образец № 2 | Образец № 3 |
| 1 | Плавленный периклазохромит фр. 3-0 мм | 59-63 | - | 64-65 |
| 2 | Плавленный периклазохромит фр. 2-0 мм | - | 57-58 | - |
| 3 | Хромит фр. 0,5-0 мм | 7-8 | - | - |
| 4 | Хромит фр. 1,0-0 мм | - | 18-20 | 7-10 |
| 5 | Спеченный периклаз фр. 2-0,5 мм | 3-5 | - | - |
| 6 | Т/м смесь плавленого периклаза и хромита | 25-30 | 23-24 | 26-28 |

Образец № 2 состоит из зерен периклазохромита, в основном поликристаллического строения, с размером включений хромшпинелида до 10 мкм. В тонкомолотой составляющей - плавленный периклазохромит. Хромит фракции 1-0 мм, который, как и в образце № 1, хорошо спечен и имеет хороший керамический каркас с тонкомолотой составляющей. Поры крупнее, чем в изделии образца № 1

(по видимому, из-за крупной фракции хромита), средний размер пор 80-200 мкм. По сравнению с образцом № 1 в изделии образца № 2 мелких пор меньше, крупных больше.

Таблица 2.5 – Минерально-фазовый состав для периклазохромитовых изделий после службы в футеровке циркуляционного вакууматора

| № | Минерально-фазовый состав, массовая доля, % | Образец №1 | | Образец №2 | | Образец №3 | |
|---|---|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| | | Рабочая зона | Наименее измененная зона | Рабочая зона | Наименее измененная зона | Рабочая зона | Наименее измененная зона |
| 1 | Периклазохромит | 64-71 | 77-78 | 61-66 | 71-75 | 71-73 | 82-85 |
| 2 | Хромит | 8-10 | 8-10 | 15-20 | 15-20 | 5-8 | 5-8 |
| 3 | Хромшпинелид | 7-8 | 7-8 | 6-8 | 6-8 | 3-5 | 3-5 |
| 4 | Силикаты (монтichelлит, мервинит, ларнит и др.) | 12-18 | 2-3 | 3-5 | 2-3 | 6-8 | 3-5 |
| 5 | Браунмиллерит | - | - | 1-2 | - | ~1 | >1 |
| 6 | Магнезиоферрит, феррохромшпинелид | - | 2-3 | 5-6 | - | 8-9 | - |
| 7 | Прочие (шпинелид, ванадат Са и др.) | ~1 | >1 | ~1 | >1 | ~1 | >1 |
| 8 | | | | | | | |

Образец № 3 состоит в основном из монокристаллических зёрен периклазохромита, с включениями хромшпинелида ещё меньших размеров, чем в изделии образца № 2 и составляет в среднем 1-3 мкм. Периклаз насыщен хромшпинелидом неравномерно (есть зёрна, как с хорошим насыщением, так и с плохим). Хромит фракции 0,5-0 мм, с частицами связан плохой неудовлетворительной связью, по видимому из-за того, что при твердофазной диффузии хромит отдаёт ионы хрома в близлежащий периклаз, который, в свою очередь, плохо насыщен хромшпинелидом и испытывает его недостаток, в отличие от образцов №№ 1 и 2. Поры в образце № 3 очень крупные, их много и они в основном приурочены к зёрнам хромита, а также расположены вокруг них, мелких же пор очень мало. Средний размер преобладающих пор 200-450 мкм.

Таким образом, разная стойкость образцов №№ 1, 2 и 3 обусловлена несколькими причинами:

1. Обнаружена разница в микроструктурах малоизмененных зон:

- в изделии № 1 микропористое, губчатоподобное строение с размерами преобладающих пор 40-80 мкм, с мелкой фракцией хромита, хорошо спеченной с периклазохромитом; в тонкомолотой составляющей использован плавленный периклазохромит;

- в изделии № 2 – среднепористое строение, с размерами преобладающих пор 80-200 мкм; хромит введен в крупной фракции 1-0 мм, но спечен с тонкомолотой составляющей хорошо, локальной связью; в тонкомолотой составляющей использован плавленный периклазохромит;

- в изделии № 3 практически нет мелких пор, преобладают крупные поры, размерами 200-450 мкм; в тонкомолотой составляющей использован спеченный периклаз; как негативный фактор наблюдаются сгустки – непромеси, занимающие 20-30 % общей площади и состоящие из керамически несвязанного плавленого периклаза и органического вещества.

2. Наблюдается разница микроструктур в горячих зонах:

- в изделии № 1 глубокая пропитка силикатами, но примерно, 50 % мелких пор все равно остаются незаполненными, т.е. микропористое и хорошо спеченное строение сохраняется, как и в холодной зоне;

- в изделии № 2 неглубокая пропитка силикатами, очень плотноспеченное строение, что обеспечивает высокую прочность. Крупных пор практически нет, мелкие коагулируются;

- в изделии № 3 из сливного патрубка шлаковая корка отсутствует – сколота, поэтому пропитка силикатами небольшая, во впускном патрубке – шлаковая корка есть, но пропитка силикатами тоже неглубокая, примерно как в изделии № 2; характерным для рабочей зоны изделия № 3 является мощное спекание локальными зонами, т.е. микроструктура неоднородна, немонолитна, наблюдаются крупные поры, которые не повышают термостойкость и сильно понижают механическую прочность.

Из вышесказанного следует, что изделия со структурой, как у образца № 3, изначально не обладая высокой механической прочностью, даже при небольших перерождениях в микроструктуре склонны к скалыванию, и механизм износа заключается в пропитке изделий силикатами, качественном спекании локальных участков рабочей зоны с образованием крупных пор и трещин, по которым происходит скалывание отдельными слоями.

У изделий со структурой, характерной для образцов №№ 1 и 2 механизм износа схож. Изделия в первом образце обладают более высокой керамической прочностью, а также благодаря микропористому строению, не подвержены резкому трещинообразованию и скалыванию. В образце № 2 изделия больше склонны к эрозионному и коррозионному износу, чем в образце № 1 вследствие наличия более крупных пор и меньшего количества мелких.

Таким образом, показано, что наибольшая стойкость достигнута на изделиях, в которых используется плавный периклазохромит с большим размером кристаллов, равномерным распределением хромшпинелида и дополнительно упрочненными добавкой тонкой фракции плавного периклазохромита. Высокообоженные изделия с прямой связью между периклазом и хромитом, имея меньший размер кристаллов спеченного периклаза, показывают меньшую стойкость. Ещё более низкую стойкость показывают изделия, где недостаточный контакт между зёрнами хромита и периклаза, и структура огнеупора неоднородна. Изделия, имеющие прочность при сжатии не менее 70 Н/мм^2 , кажущуюся пористость не более 13% и содержание оксида кремния не более 0,9 % в условиях эксплуатации циркуляционных вакууматоров показывают максимальную стойкость [107].

При использовании огнеупорных изделий с предложенными параметрами на циркуляционных вакууматорах ОАО «ЕВРАЗ НТМК» увеличилось время эксплуатации с 1355 до 1545 минут вакуумирования, что соответствует 88 и 100 плавкам соответственно, что подтверждено заключением (Приложение Б).

В настоящее время предложенные огнеупорные изделия применяются на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и ОАО «ММК», что подтверждается актами внедрения их в производство (Приложение Б, В, Г).

2.4 Выводы к главе 2

1. Технологические решения позволили уменьшить количество аварийных выводов вакуум - камер из работы, повысить время их эксплуатации на 10-15 % и стабилизировать процесс вакуумирования транспортного металла в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

2. Проведены работы по исследованию структуры периклазохромитовых огнеупоров предназначенных для циркуляционных вакууматоров.

- изучена зависимость удельного износа периклазохромитовых изделий в зависимости от их структуры;

- наибольшая стойкость достигается на изделиях, в которых используется плавный периклазохромит с размером кристаллов 300-2400 мкм, равномерным распределением хромшпинелида и дополнительно упрочненными добавкой тонкой фракции плавного периклазохромита;

- установлено, что изделия, имеющие прочность при сжатии не менее 70 Н/мм², кажущуюся пористость не более 13% и содержание оксида кремния не более 0,6% в условиях эксплуатации циркуляционных вакууматоров показывают максимальную стойкость.

3. Огнеупорные изделия с предложенными физико-химическими свойствами применяются в футеровках циркуляционных вакууматоров на ведущих предприятиях России: ОАО «ЕВРАЗ НТМК», ОАО «ММК», что подтверждается актами и заключениями о внедрении их в производство.

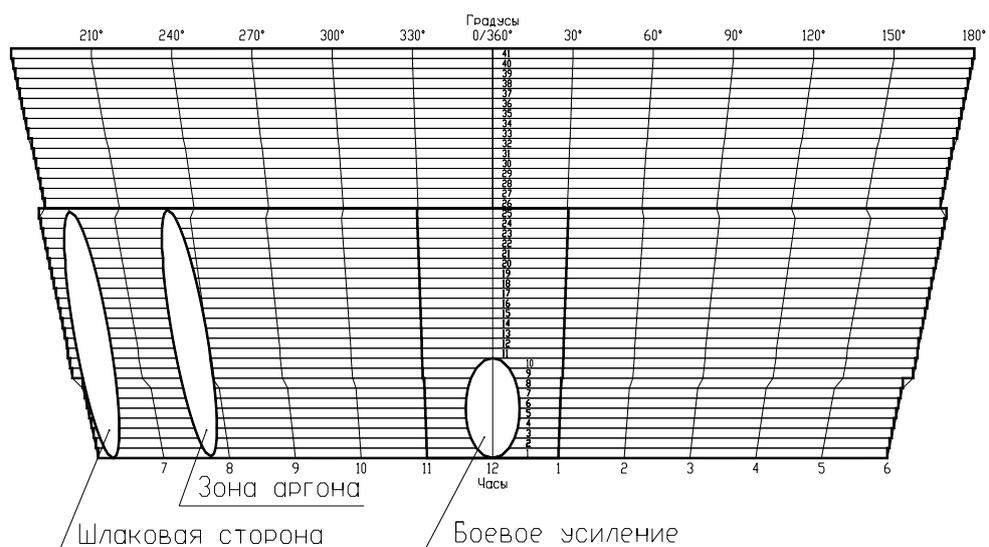
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ШЛАКА НА ИЗНОС ФУТЕРОВКИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА УЧАСТКЕ КОВШОВОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ И ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ШЛАКА

3.1 Оценка влияния состава шлака на износ футеровки сталеразливочных агрегатов участка ковшовой обработки стали

Для оценки влияния состава шлака на износ футеровки сталеразливочного ковша был обработан большой массив данных. Целью работы было выявление закономерностей и нахождение взаимосвязей между составом шлака, технологическими показателями эксплуатации сталеплавильных агрегатов и износом футеровки [111]. Для этого была сделана выборка, состоящая из 67 сталеразливочных ковшей за два года эксплуатации.

На каждом из отобранных сталеразливочных ковшей производились замеры остаточной толщины футеровки, выполненной из алюмопериклазоуглеродистых изделий, с первого по 25 ряд в трех зонах (рис. 3.1):

- стена со стороны подачи аргона;
- боевое утолщение на стене;
- шлаковая сторона на стене.



1 – шлаковая сторона; 2 – боевое утолщение; 3 – зона подачи нейтрального газа
Рисунок 3.1 – Зоны сталеразливочного ковша

Далее, в зависимости от толщины футеровки, рассчитывали удельный износ огнеупорных изделий. Средняя остаточная толщина и удельный износ представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Средняя остаточная толщина и удельный износ огнеупорных изделий рассматриваемых сталеразливочных ковшей

| Номер п/п | Номер стальной ковш | Начало эксплуатации сталеразливочного ковша | Конец эксплуатации сталеразливочного ковша | Достигнутая стойкость, пл. | Средняя остаточная толщина огнеупорных изделий в зоне подачи аргона, мм | Средняя остаточная толщина огнеупорных изделий в зоне боевого утолщения, мм | Средняя остаточная толщина огнеупорных изделий со стороны кантовки шлака, мм | Удельный износ огнеупорных изделий в зоне аргона, мм/пл. | Удельный износ огнеупорных изделий в зоне боевого утолщения, мм/пл | Удельный износ огнеупорных изделий со стороны кантовки шлака, мм/пл. |
|-----------|---------------------|---|--|----------------------------|---|---|--|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 43 | 30.03.2009 | 04.05.2009 | 85 | 71,47 | 81,36 | 75,47 | 0,95 | 1,30 | 0,91 |
| 2 | 32 | 31.03.2009 | 20.05.2009 | 69 | 88,62 | 118,77 | 99,95 | 0,92 | 1,05 | 0,76 |
| 3 | 38 | 06.04.2009 | 13.05.2009 | 85 | 75,87 | 96,65 | 74,07 | 0,90 | 1,12 | 0,92 |
| 4 | 44 | 06.04.2009 | 13.05.2009 | 86 | 76,27 | 83,79 | 77,40 | 0,89 | 1,25 | 0,87 |
| 5 | 5 | 06.04.2009 | 18.05.2009 | 85 | 75,07 | 60,40 | 66,47 | 0,91 | 1,54 | 1,01 |
| 6 | 18 | 08.04.2009 | 13.05.2009 | 86 | 75,07 | 64,76 | 68,50 | 0,90 | 1,47 | 0,98 |
| 7 | 22 | 08.04.2009 | 20.05.2009 | 85 | 71,07 | 93,35 | 69,87 | 0,96 | 1,15 | 0,97 |
| 8 | 36 | 12.04.2009 | 13.05.2009 | 86 | 88,87 | 65,18 | 92,17 | 0,74 | 1,47 | 0,70 |
| 9 | 23 | 16.04.2009 | 27.05.2009 | 85 | 72,67 | 66,54 | 71,87 | 0,94 | 1,47 | 0,95 |
| 10 | 10 | 16.04.2009 | 23.06.2009 | 85 | 77,78 | 105,04 | 72,37 | 0,88 | 1,02 | 0,94 |
| 11 | 3 | 17.04.2009 | 04.06.2009 | 86 | 70,51 | 92,20 | 64,71 | 0,95 | 1,15 | 1,02 |
| 12 | 15 | 18.04.2009 | 04.05.2009 | 86 | 74,47 | 69,61 | 71,73 | 0,91 | 1,42 | 0,94 |
| 13 | 9 | 19.04.2009 | 30.05.2009 | 86 | 60,28 | 93,26 | 58,99 | 1,07 | 1,14 | 1,09 |
| 14 | 16 | 21.04.2009 | 31.05.2009 | 86 | 73,47 | 62,77 | 74,16 | 0,92 | 1,50 | 0,91 |
| 15 | 24 | 24.04.2009 | 04.06.2009 | 86 | 70,27 | 63,23 | 67,89 | 0,95 | 1,49 | 0,98 |
| 16 | 42 | 30.05.2009 | 26.06.2009 | 85 | 72,27 | 69,33 | 72,27 | 0,94 | 1,44 | 0,94 |
| 17 | 32 | 30.05.2009 | 09.07.2009 | 85 | 73,07 | 77,90 | 73,87 | 0,93 | 1,34 | 0,92 |
| 18 | 27 | 03.06.2009 | 30.06.2009 | 85 | 73,87 | 82,90 | 57,47 | 0,92 | 1,28 | 1,12 |
| 19 | 16 | 03.06.2009 | 03.07.2009 | 85 | 73,67 | 69,33 | 72,27 | 0,93 | 1,44 | 0,94 |
| 20 | 7 | 04.06.2009 | 22.07.2009 | 85 | 68,87 | 90,12 | 66,07 | 0,98 | 1,19 | 1,02 |
| 21 | 9 | 06.06.2009 | 04.07.2009 | 86 | 63,97 | 101,86 | 62,96 | 1,03 | 1,04 | 1,04 |
| 22 | 41 | 07.06.2009 | 03.07.2009 | 85 | 70,67 | 72,19 | 68,87 | 0,96 | 1,40 | 0,98 |
| 23 | 31 | 08.06.2009 | 09.07.2009 | 85 | 72,27 | 70,12 | 69,27 | 0,94 | 1,43 | 0,98 |
| 24 | 34 | 21.06.2009 | 23.07.2009 | 85 | 47,76 | 78,90 | 40,76 | 1,23 | 1,32 | 1,31 |
| 25 | 12 | 26.06.2009 | 22.08.2009 | 85 | 76,47 | 103,61 | 72,47 | 0,89 | 1,03 | 0,94 |
| 26 | 17 | 02.07.2009 | 20.08.2009 | 85 | 68,87 | 99,01 | 66,27 | 0,98 | 1,09 | 1,01 |
| 27 | 33 | 14.12.2009 | 09.01.2010 | 90 | 68,32 | 104,57 | 69,32 | 0,93 | 0,97 | 0,92 |
| 28 | 27 | 17.12.2009 | 18.01.2010 | 93 | 48,78 | 99,95 | 40,30 | 1,11 | 0,98 | 1,21 |

Продолжение таблицы 3.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----|----|------------|------------|----|-------|--------|-------|------|------|------|
| 29 | 3 | 14.02.2010 | 09.03.2010 | 85 | 81,67 | 110,40 | 76,07 | 0,83 | 0,95 | 0,90 |
| 30 | 21 | 17.02.2010 | 19.03.2010 | 85 | 85,07 | 112,90 | 74,07 | 0,79 | 0,92 | 0,92 |
| 31 | 29 | 18.02.2010 | 12.03.2010 | 85 | 71,47 | 92,28 | 66,27 | 0,95 | 1,17 | 1,01 |
| 32 | 2 | 20.02.2010 | 14.03.2010 | 85 | 86,47 | 104,78 | 76,07 | 0,78 | 1,02 | 0,90 |
| 33 | 40 | 22.02.2010 | 19.03.2010 | 85 | 63,07 | 107,28 | 60,07 | 1,05 | 0,99 | 1,09 |
| 34 | 1 | 26.02.2010 | 26.03.2010 | 85 | 73,07 | 107,90 | 70,47 | 0,93 | 0,98 | 0,96 |
| 35 | 10 | 27.02.2010 | 22.03.2010 | 85 | 79,67 | 102,07 | 77,07 | 0,86 | 1,05 | 0,89 |
| 36 | 27 | 27.02.2010 | 03.04.2010 | 85 | 83,87 | 115,40 | 79,07 | 0,81 | 0,90 | 0,86 |
| 37 | 12 | 02.03.2010 | 10.04.2010 | 85 | 70,07 | 110,40 | 66,07 | 0,97 | 0,95 | 1,02 |
| 38 | 33 | 03.03.2010 | 28.03.2010 | 85 | 87,87 | 125,12 | 83,47 | 0,76 | 0,78 | 0,81 |
| 39 | 40 | 28.03.2010 | 24.04.2010 | 85 | 73,67 | 107,90 | 68,87 | 0,93 | 0,98 | 0,98 |
| 40 | 10 | 29.03.2010 | 28.04.2010 | 85 | 78,67 | 104,90 | 72,27 | 0,87 | 1,02 | 0,94 |
| 41 | 1 | 30.03.2010 | 26.04.2010 | 85 | 73,27 | 107,90 | 68,47 | 0,93 | 0,98 | 0,99 |
| 42 | 34 | 04.04.2010 | 28.04.2010 | 85 | 77,27 | 96,90 | 76,07 | 0,88 | 1,11 | 0,90 |
| 43 | 20 | 09.04.2010 | 10.05.2010 | 85 | 70,50 | 92,90 | 63,67 | 0,96 | 1,16 | 1,04 |
| 44 | 15 | 10.04.2010 | 18.05.2010 | 85 | 70,82 | 85,68 | 66,50 | 0,96 | 1,24 | 1,01 |
| 45 | 27 | 12.04.2010 | 17.05.2010 | 85 | 67,72 | 82,90 | 60,87 | 1,00 | 1,28 | 1,08 |
| 46 | 31 | 17.05.2010 | 12.07.2010 | 85 | 72,07 | 88,46 | 48,60 | 0,95 | 1,21 | 1,22 |
| 47 | 30 | 25.05.2010 | 02.07.2010 | 85 | 61,27 | 86,65 | 38,84 | 1,07 | 1,23 | 1,34 |
| 48 | 23 | 08.06.2010 | 12.07.2010 | 85 | 42,00 | 71,23 | 38,60 | 1,30 | 1,41 | 1,34 |
| 49 | 42 | 10.06.2010 | 13.08.2010 | 85 | 75,00 | 99,90 | 47,00 | 0,91 | 1,08 | 1,24 |
| 50 | 2 | 12.06.2010 | 15.07.2010 | 85 | 35,79 | 62,90 | 33,41 | 1,37 | 1,51 | 1,40 |
| 51 | 16 | 14.06.2010 | 23.07.2010 | 85 | 67,20 | 92,90 | 38,40 | 1,00 | 1,16 | 1,34 |
| 52 | 33 | 29.06.2010 | 30.07.2010 | 85 | 50,80 | 110,40 | 51,40 | 1,20 | 0,95 | 1,19 |
| 53 | 26 | 04.07.2010 | 06.08.2010 | 85 | 54,60 | 112,90 | 55,40 | 1,15 | 0,92 | 1,14 |
| 54 | 34 | 12.07.2010 | 23.07.2010 | 85 | 70,80 | 79,57 | 40,40 | 0,96 | 1,32 | 1,32 |
| 55 | 8 | 21.07.2010 | 21.08.2010 | 85 | 57,60 | 106,90 | 52,20 | 1,12 | 1,00 | 1,18 |
| 56 | 17 | 22.07.2010 | 26.08.2010 | 85 | 75,20 | 92,90 | 46,20 | 0,91 | 1,16 | 1,25 |
| 57 | 16 | 26.07.2010 | 07.09.2010 | 85 | 34,12 | 67,90 | 31,00 | 1,39 | 1,45 | 1,43 |
| 58 | 20 | 27.07.2010 | 26.08.2010 | 85 | 35,20 | 62,90 | 35,00 | 1,38 | 1,51 | 1,38 |
| 59 | 33 | 03.08.2010 | 06.09.2010 | 85 | 84,80 | 103,90 | 51,20 | 0,80 | 1,03 | 1,19 |
| 60 | 5 | 08.08.2010 | 12.10.2010 | 80 | 79,40 | 87,90 | 72,80 | 0,91 | 1,30 | 1,00 |
| 61 | 25 | 11.08.2010 | 06.09.2010 | 80 | 68,60 | 91,79 | 63,60 | 1,05 | 1,25 | 1,11 |
| 61 | 30 | 11.08.2010 | 13.09.2010 | 80 | 57,60 | 104,90 | 53,20 | 1,19 | 1,08 | 1,24 |
| 63 | 12 | 21.08.2010 | 20.09.2010 | 80 | 70,20 | 57,90 | 60,40 | 1,03 | 1,67 | 1,15 |
| 64 | 27 | 22.08.2010 | 18.09.2010 | 80 | 64,20 | 42,90 | 68,56 | 1,10 | 1,86 | 1,05 |
| 65 | 31 | 06.09.2010 | 28.10.2010 | 80 | 60,16 | 84,90 | 55,31 | 1,15 | 1,33 | 1,21 |
| 66 | 25 | 08.09.2010 | 12.10.2010 | 80 | 78,00 | 88,81 | 55,43 | 0,93 | 1,28 | 1,21 |
| 67 | 43 | 08.09.2010 | 13.10.2010 | 80 | 75,00 | 78,61 | 74,00 | 0,97 | 1,41 | 0,98 |

Из-за отсутствия полных данных, по химическому составу шлака, наводимого на АКП, его состав определяли расчетным путем.

3.1.1 Определение состава шлака, наводимого на АКП

Состав шлака определяли по материальному балансу, учитывая особенности производства конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Расчет состава шлака разделили на несколько этапов:

- расчет количества и состава оксидов, образовавшихся при раскислении металла и его доводки по химическому составу;
- расчет количества и состава оксидов, вводимых при добавке шлакообразующих материалов на АКП;
- расчет массы шлака, попадающего в сталеразливочный ковш из конвертера при сливе металла (по расчетным данным, которые представлены в разд. 3.1.2, масса шлака составляет 950 кг);
- расчет окончательного состава шлака, его массы и объема (совмещение шлака, образовавшегося при раскислении и доводке металла, со шлакообразующими материалами на АКП и со шлаком, попавшим в сталеразливочный ковш из конвертера);
- сопоставление расчетного состава с составом, определенным химическим анализом.

Состав шлака, рассчитанный по материальному балансу, сравнили с составом шлака определенным химическим составом. Разница между методами определения состава шлака составила от 3-5 %. Расчетный состав шлака представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетный состав шлака на АКП, %

| Содержание компонента | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO |
|-------------------------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|
| Минимальные и максимальные значения | 38-80 | 8-30 | 1-25 | 1-11 |
| Средние значения | 64 | 16 | 11 | 5 |

3.1.2 Расчет количества шлака, попадающего в сталеразливочный ковш при сливе металла из конвертера

Конвертерный шлак, попадающий в сталеразливочный ковш во время выпуска стали, по данным [112] можно разделить на три разновидности:

- первичный шлак, попадающий в сталеразливочный ковш при наклоне конвертера в начальной стадии слива металла (составляет 10-20% от общего объёма конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш);
- промежуточный шлак, затягивается в струю металла сливной воронкой во время выпуска (составляет 30-40% от общего объёма конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш);
- конечный шлак, попадающий в сталеразливочный ковш при подъеме конвертера в начальное положение (составляет 40-60% от общего объёма конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш).

Общее количество конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш, рассчитывали по показателям рефосфорации, т.е. обратного перехода фосфора из шлака в металл. Зная количество обратного перехода фосфора из шлака, можно оценить его реальное количество.

При математическом описании закономерностей изменения содержания фосфора удобно пользоваться степенью рафинирования R_E , выражающую отношение начального содержания примеси $[E]_H$ к конечному содержанию $[E]_K$, т.е. показывающую, во сколько раз уменьшится содержание примеси в металле в процессе рафинирования [1].

$$R_E = \frac{[E]_H}{[E]_K}, \quad (3.1)$$

По данной формуле можно найти конечное содержание примеси в металле и её оксида в шлаке [1].

$$[E]_K = \frac{[E]_H}{R_E}, \quad (3.2)$$

$$(E_m O_n)_K = \frac{100 \cdot \beta_E \cdot [E]_H}{g_{шл}} \cdot \left(1 - \frac{1}{R_E}\right), \quad (3.3)$$

где, $g_{шл}$ – количество шлака, взаимодействовавшего с металлом, кг/100 кг (%);

β_E – стехиометрический коэффициент, выражающий количество оксида, которое получится при окислении 1 кг рассматриваемой примеси, кг/кг.

При окислении фосфора до пятивалентного состояния по реакции $4P + 5O_2 = 2P_2O_5$ стехиометрический коэффициент, по данным [113] равен 2,29.

Преобразуя формулы (3.1)-(3.3) получили уравнение массы шлака в сталеразливочном ковше, при которой в металл переходит заданное количество фосфора.

$$M_{ш} = \frac{M_{Me} \cdot \beta_E \cdot ([E]_K \cdot (1 - R_E) - [E]_{\phi})}{(P_2O_5)}, \quad (3.4)$$

где, M_{Me} – масса металла в сталеразливочном ковше (по данным [114] составляет 160 тонн);

$[E]_K$ – конечное содержание фосфора в слитках;

$[E]_{\phi}$ – количество фосфора привносимого ферросплавами;

R_E – степень рафинирования;

(P_2O_5) – содержание оксида фосфора в шлаке (по данным [114] составляет 2,5 %).

При расчетах массы шлака, попадаемого из конвертера в сталеразливочный ковш, необходимо учитывать газодинамическую отсечку, т.к. после реконструкции конвертерного цеха на все конверторы, выплавляющие сталь, было установлено пневмомеханическое устройство отсечки шлака VAI-CON Stopper [115]. Поэтому для расчета степени рафинирования (R_E) использовали показатель рефосфорации стали на опытных (с газодинамической отсечкой шлака при выпуске металла из конвертера) и на сравнительных плавках [114], которые представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Средние показатели рефосфорации стали на опытных (с газодинамической отсечкой шлака при выпуске металла из конвертера) и на сравнительных плавках

| Вид | Марка стали | Количество плавков | Содержание P в металле перед выпуском, % | Среднее содержание P в слитках, % |
|---------------|-------------|--------------------|--|-----------------------------------|
| Опытные | 09Г2С | 12 | 0,009 | 0,0215 |
| Сравнительные | 09Г2С | 13 | 0,010 | 0,0285 |

По данным, представленным в таблице 3.3 получается, что для условий ОАО «ЕВРАЗ НТМК» $R_E = 0,42$ (с газодинамической отсечкой) и $R_E = 0,33$ - по обычной технологии.

При выпуске плавки на стальном переделе первичный и промежуточный шлаки в первую очередь взаимодействуют с присаживаемыми в ковш во время выпуска раскислителями и примерно 40-60% от уровня рефосфорации приходится на их долю. При раскислении стали марок 09Г2С ферросплавами, в основном силикомаргенцем, вносится в металл 0,006% P [112].

По формуле 3.4 рассчитали массу шлака с газодинамической отсечкой

$$M_{ш} = \frac{160 \cdot 2,29 \cdot (0,0215 \cdot (1 - 0,4) - 0,006)}{2,5} = 948,2 \text{ кг}$$

и рассчитывали массу шлака без газодинамической отсечки

$$M_{ш} = \frac{160 \cdot 2,29 \cdot (0,0285 \cdot (1 - 0,31) - 0,006)}{2,5} = 2066,5 \text{ кг}$$

По расчетным данным, на плавках с газодинамической отсечкой шлака количество конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш, на 46% меньше, чем по обычной технологии.

По лабораторным работам, проведенных в Донецком национальном техническом университете (Украина) на физических моделях, соответствующих емкости 160-тонного конвертера с газодинамической отсечкой, количество шлака, попадающего из конвертера в сталеразливочный ковш находится в пределах от 35 до 42% [116].

Поэтому можно считать, что полученные математическим расчетом значения, по количеству конвертерного шлака, попадающего в сталеразливочный ковш, совпадают с реальными данными.

3.1.3 Оценка влияния состава шлака на износ футеровки сталеразливочных ковшей

Анализировались данные удельного износа футеровки сталеразливочного ковша (стальковша) в зависимости от следующих параметров:

- температура футеровки стальковша перед постановкой под плавку, °С;

- температура слива металла из конвертера в стальковш, °С;
- температура металла в стальковше после слива металла, °С;
- время движения стальковша до АКП, мин.;
- время обработки металла на АКП, мин.;
- время обработки металла на вакууматоре, мин.;
- % плавков обработанных на вакууматоре;
- температура металла в начале обработки на АКП, °С;
- температура металла после обработки на АКП, °С;
- % плавков разлитых на МНЛЗ–1;
- % плавков разлитых на МНЛЗ–2;
- % плавков разлитых на МНЛЗ–3;
- % плавков разлитых на МНЛЗ–4;
- время от окончания выпуска металла из конвертера и окончания разливки на МНЛЗ, мин.;
- масса шлака в сталеразливочном ковше, кг;
- содержание SiO_2 в шлаке, %;
- содержание CaO в шлаке, %;
- содержание MgO в шлаке, %;
- % плавков при сливе металла из конвертера с содержанием углерода менее 0,1 %;
- % плавков при сливе металла из конвертера с содержанием углерода от 0,1 до 0,4 %;
- % плавков при сливе металла из конвертера с содержанием углерода более 0,4 %;
- % плавков по марочному паспорту с содержанием углерода менее 0,1 %;
- % плавков по марочному паспорту с содержанием углерода от 0,1 до 0,4 %;
- % плавков по марочному паспорту с содержанием углерода более 0,4 %.

Взаимосвязь между технологическими факторами и износом футеровки определяли с помощью метода парных корреляций [117, 118].

Коэффициент линейной парной корреляции характеризуют тесноту (силу) линейной связи между двумя переменными. При выборке в 78 сталковшей, коэффициент уровня значимости линейной парной корреляции равен 0,23 [119].

Полученные результаты обобщили в таблицу 3.4, анализируя которые, можно сделать следующие выводы:

- наименее подвержены износу огнеупорные изделия более высокого качества, установленные в боевом усилении;
- увеличение температуры и времени нахождения металла и шлака в ковше увеличивают износ огнеупорных изделий;
- повышенное содержание оксидов магния и кальция в высокоосновном шлаке способствуют снижению износа футеровки;
- взаимосвязь износа алюмопериклазоуглеродистых изделий в футеровке сталеразливочного ковша с содержанием углерода, как на повалке конвертера, так и в марочном составе не выявлена.

Согласно приведенным данным (табл. 3.4) – наименее подвержены износу огнеупорные изделия более высокого качества, установленные в боевом усилении. Этот пункт детально изучен специалистами ОАО «ЕВРАЗ НТМК» применительно к условиям эксплуатации сталеразливочных ковшей в конвертерном цехе [56, 57]. Действительно, огнеупорные изделия более высокого качества показывают более высокую стойкость и влияние технологических факторов на данный тип изделий минимально.

В проведенных исследованиях возникает необходимость аппроксимировать (описать приблизительно) взаимосвязь между износом футеровки и выявленными математическим уравнением значимыми факторами. То есть, зависимость между переменными величинами удельного износа футеровки и параметрами эксплуатации можно выразить аналитически с помощью математической формулы.

Признак Y (в нашем случае – это удельный износ футеровки) рассматривается как функция многих аргументов – x_1, x_2, x_3, \dots – и может быть записана в виде:

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + \dots, \quad (3.5)$$

Таблица 3.4 – Влияние технологических факторов на износ футеровки сталеразливочного ковша

| Фактор | Зона аргона | Зона боевого утолщения | Зона кантовки шлака |
|---|-------------|------------------------|---------------------|
| Температура футеровки сталеразливочного ковша перед постановкой под плавку | I | + | I |
| Температура металла перед сливом из конвертера в сталеразливочный ковш | + | I | * |
| Температура металла в сталеразливочном ковше после слива из конвертера | + | I | I |
| Время движения сталеразливочного ковша до АКП. | + | I | - |
| Время обработки металла на АКП | I | I | I |
| Время обработки на вакууматоре | I | I | I |
| % плавов обработанных на вакууматоре | + | I | * |
| Температура металла в начале обработки на АКП | I | I | I |
| Температура металла в конце обработки на АКП | I | I | I |
| % плавов разлитых на мнз-1 | I | I | I |
| % плавов разлитых на мнз-2 | I | I | I |
| % плавов разлитых на мнз-3 | + | I | + |
| % плавов разлитых на мнз-4 | I | I | I |
| Время от конца выпуска металла из конвертера до конца разливки. | * | I | * |
| Масса шлака | * | I | * |
| %SiO ₂ | I | - | I |
| %CaO | - | I | - |
| % MgO | - | II | - |
| % плавов с содержанием углерода, при сливе металла из конвертера, менее 0,2 % | I | I | I |
| % плавов с содержанием углерода, при сливе металла из конвертера, от 0,2 до 0,4 % | I | I | I |
| % плавов с содержанием углерода, при сливе металла из конвертера, более 0,4 % | I | I | I |
| % плавов с содержанием углерода, по марочному паспорту плавки, менее 0,2 % | I | I | I |
| % плавов с содержанием углерода, по марочному паспорту плавки, от 0,2 до 0,4 % | I | I | I |
| % плавов с содержанием углерода, по марочному паспорту плавки, более 0,4 %. | I | I | I |

+ слабая линейная связь, прямо пропорционально направленная на увеличение износа футеровки;

* сильная линейная связь, прямо пропорционально направленная на увеличение износа футеровки;

- слабая линейная связь, обратно пропорционально направленная на уменьшение износа футеровки;

I – взаимосвязи между параметрами не выявлено.

Уравнение регрессии износа футеровки со стороны подачи аргона, с коэффициентом корреляции 0,64 имеет вид:

$$Y_{Ar} = -0,1134 + 0,0025 \cdot X_1 + 0,0026 \cdot X_2 + 0,0013 \cdot X_3 - 0,0374 \cdot X_4 - 0,1203 \cdot X_5, \quad (3.6)$$

где, Y_{Ar} – удельный износ футеровки со стороны подачи аргона, мм/плавку;

X_{1Ar} – температура металла в сталеразливочном ковше после слива стали из конвертера, °С;

X_{2Ar} – время движения сталеразливочного ковша до АКП, мин.;

X_{3Ar} – время от конца выпуска металла из конвертера до конца разливки, мин.;

X_{4Ar} – содержание СаО в шлаке, %;

X_{5Ar} – содержание MgО в шлаке, %.

Уравнение регрессии износа футеровки боевого усиления, с коэффициентом корреляции 0,51 имеет вид:

$$Y_{BY} = -1,9914 + 0,0036 \cdot X_1 - 0,0054 \cdot X_2, \quad (3.7)$$

где, Y_{BY} – удельный износ футеровки боевого усиления, мм/плавку;

X_{1BY} – температура футеровки сталеразливочного ковша перед постановкой под слив металла из конвертера. °С;

X_{2BY} – % плавков с содержанием углерода более 0,4 % углерода.

Уравнение регрессии износа футеровки шлаковой стороны, с коэффициентом корреляции 0,73 имеет вид:

$$Y_{ШС} = -4,2849 + 0,0059 \cdot X_1 + 0,0086 \cdot X_2 + 0,0020 \cdot X_3 - 0,0020 \cdot X_4 - 0,0558 \cdot X_5 - 0,1197 \cdot X_6, \quad (3.8)$$

где, $Y_{ШС}$ – удельный износ футеровки шлаковой стороны, мм/плавку;

$X_{1ШС}$ – температура металла в конвертере перед повалкой, °С;

$X_{2ШС}$ – время движения сталеразливочного ковша до АКП, °С;

$X_{3ШС}$ – % обработанных плавков на циркуляционном вакууматоре;

$X_{4ШС}$ – время от окончания выпуска металла из конвертера и окончания разливки на МНЛЗ, мин.;

$X_{5ШС}$ – содержание СаО в шлаке, %;

$X_{6ШС}$ – содержание MgО в шлаке, %.

Полученное уравнение регрессии удельного износа стеновых изделий сталеразливочного ковша со стороны подачи аргона и были проверены на

16 аналогичных агрегатах эксплуатировавшихся в 2010-2011 годах. По техническим причинам замеры в других зонах не проводились, поэтому сравнение уравнений регрессии удельного износа боевого усиления и шлаковой стороны не проводилось. Расхождение расчетного удельного износа с реальным варьируется в пределах от -1,7 до +27,5%. Полученные результаты представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты проверки уравнения регрессии износа футеровки со стороны подачи аргона

| № п/п | № стальнойковша | начало эксплуатации | конец эксплуатации | Средняя остаточная толщина, мм. | Средний удельный износ, мм/пл. | Расчетный удельный износ, мм/пл. | % несхождения |
|-------|-----------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 1 | 23 | 14.11.2011 | 12.12.2011 | 78 | 0,925 | 0,965 | 4,1 |
| 2 | 10 | 30.10.2011 | 10.12.2011 | 94 | 0,725 | 1,006 | 27,9 |
| 3 | 2 | 18.11.2011 | 15.12.2011 | 73 | 0,9875 | 0,989 | 0,1 |
| 4 | 6 | 17.11.2011 | 12.15.2011 | 78 | 0,925 | 1,035 | 10,7 |
| 5 | 22 | 8.11.2011 | 12.12.2011 | 74 | 0,975 | 0,979 | 0,5 |
| 6 | 3 | 6.11.2011 | 14.12.2011 | 71 | 1,0125 | 0,995 | -1,7 |
| 7 | 21 | 11.11.2012 | 12.12.2011 | 73 | 0,9875 | 1,023 | 3,5 |
| 8 | 36 | 1.10.2011 | 8.11.2011 | 78 | 0,925 | 1,043 | 11,3 |
| 9 | 1 | 19.06.2011 | 20.07.2011 | 91 | 0,7625 | 0,996 | 23,4 |
| 10 | 43 | 20.04.2011 | 26.05.2011 | 71 | 1,0125 | 1,024 | 1,1 |
| 11 | 15 | 3.04.2011 | 19.05.2011 | 85 | 0,8375 | 0,984 | 14,9 |
| 12 | 31 | 6.09.2010 | 28.10.2010 | 73 | 0,9875 | 1,048 | 5,7 |
| 13 | 43 | 8.09.2010 | 13.10.2010 | 86 | 0,825 | 1,019 | 19,1 |
| 14 | 16 | 10.08.2010 | 21.10.2010 | 91 | 0,7625 | 1,009 | 24,4 |
| 15 | 5 | 8.08.2010 | 21.10.2010 | 90 | 0,775 | 1,004 | 22,8 |
| 16 | 12 | 21.08.2010 | 20.10.2010 | 92 | 0,75 | 1,034 | 27,5 |

Данный разбег полученных значений незначителен, что позволяет применять полученную закономерность на практике при расчете среднего значения максимального удельного износа и остаточной толщины алюмопериклазовых изделий, применяемых при футеровке стен стальнойковша. Однако следует отметить, на практике стальнойковш выводят из эксплуатации при достижении гарантированной стойкости или локальном повышенном износе огнеупорных изделий, который может возникнуть вследствие нарушений условий эксплуатации, некачественно выполненной футеровки и при низких качественных показателях самих огне-

упорных изделий. Поэтому, выведенное уравнение регрессии применимо только к тем стальковшам, во время работы которых, отсутствовали вышеприведенные типы нарушений. Полученные результаты показали, что на износ футеровки стальковша влияют множество факторов, как конструкционных, так и технологических. Наименее подвержены износу огнеупорные изделия более высокого качества, установленные в боевом усилении. Увеличение температуры и времени нахождения металла и шлака в ковше увеличивают износ огнеупорных изделий. Повышенное содержание оксидов магния и кальция в шлаке снижают износ футеровки.

Решение задачи повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей носит комплексный характер, как за счет улучшения качества огнеупорных изделий, так и формирования малоагрессивного рафинирующего шлака.

3.2 Анализ влияния физико-химических свойств шлака на износ футеровки сталеразливочных ковшей в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

В простейшем рассмотрении шлак представляет собой конгломерат, состоящий из оксидов с незначительным содержанием сульфидов, являясь неизбежным побочным продуктом любого современного производства стали в открытых агрегатах. Неизбежность образования шлака связана, во-первых, с обязательным окислением элементов металлической фазы во время плавки и образованием при этом различных нелетучих (шлакообразующих оксидов), имеющих меньшую плотность, чем металл, и собирающихся на поверхности металла; во-вторых, с неизбежным разрушением футеровки в условиях высоких температур под воздействием оксидов, образующихся в результате окисления компонентов металлической фазы [1].

Для ковшовой обработки стали применяют основные шлаки, состав которых представлен в таблице 3.6 [120-122].

В сталеплавильном производстве, наведение шлака – это необходимое условие для выплавки качественного металла. Однако шлак оказывает, как положительное, так и отрицательное влияние на технологию выплавки металла.

Таблица 3.6 – Усредненный химический состав шлаков, наводимых на АКП на различных предприятиях РФ

| Наименование предприятия | Средний химический состав шлаков, % | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------|-----|--------------------------------|------|
| | CaO | SiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | FeO |
| ОАО «ЕВРАЗ НТМК» | 56,8 | 25,1 | 8,0 | 5,3 | 1,1 |
| ОАО «ЗСМК» | 48,2 | 7,3 | 6,1 | 27,4 | 3,9 |
| ОАО «Ашинский металлургический завод» | 61,2 | 17,0 | 5,1 | 9,6 | 0,52 |

Положительная роль шлаков в конвертерном производстве состоит в способности поглощать фосфор при переделе п/продукта в сталь (дефосфорация) и дополнительно удалять серу (десульфурация) из металла на АКП. Такими свойствами обладают основные шлаки, в которых преобладают основные оксиды, прежде всего CaO [1].

Отрицательная роль шлаков в основном выражается:

- в разрушающем действии на футеровку сталеплавильного агрегата;
- т.к. переокисленный шлак из конвертера с высоким содержанием FeO от 11 до 17 % [114] частично попадает в стальной ковш, то в процессе раскисления и легирования, а также окислительного рафинирования увеличиваются потери (угар) полезных компонентов.

Указанные отрицательные воздействия шлаков на ход и результаты плавки в той или иной степени проявляются в любых сталеплавильных процессах. Поэтому необходимо установить шлаковый режим (рациональный), обеспечивающий возможно большее проявление положительной роли шлаков и меньшее – отрицательной.

Проявление той или иной роли шлаков главным образом зависит от их химического состава, физического состояния (вязкости) и количества, поэтому для установления рационального шлакового режима плавки необходимо, прежде всего, знать закономерности изменения химического состава, физико-химических свойств и количества шлака.

Средний химический состав шлака, который попадает в сталеразливочный ковш при сливе металла из конвертера, представлен в таблице 3.7. Химический

состав шлака определяли химическим анализом в центральной лаборатории ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

Таблица 3.7 – Состав конвертерного шлака, %

| CaO | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | V ₂ O ₅ | TiO ₂ | MnO | MgO | FeO |
|-------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------|------|-------|
| 44,49 | 0,50 | 13,26 | 2,53 | 0,55 | 2,42 | 9,08 | 16,77 |

Химический состав шлака, который наводится на АКП, рассчитывался по методике, представленной в разделе 3.1.1 (табл.3.2).

Целью работы являлось изучение влияния технологических факторов на износ футеровки агрегатов на участке ковшовой обработки стали (КОС) и определение рациональных параметров шлака для минимизации его агрессивного воздействия на футеровку с условием достаточно качественного проведения рафинировочных процессов при обработке металла.

Анализ качественных характеристик шлака проводили с помощью полимерной модели строения шлаков (далее – ПМ) [66], предполагая, что шлаки представляют собой ионные расплавы, имеющие полимерную природу [66, 123].

С точки зрения ПМ шлаки представляют собой плотную упаковку ионов кислорода, в которой имеется два вида полостей. Тетраэдрические полости – между четырьмя ионами кислорода, центры которых образуют правильный тетраэдр, и октаэдрические – между шестью, центры которых образуют правильный октаэдр. Тетраэдрические полости заняты катионами Si⁴⁺, P⁵⁺, V³⁺; отчасти Al³⁺ и Fe³⁺. Эти элементы находятся в четверной координации по кислороду, и являются комплексообразователями или сеткообразователями. Октаэдрические полости заняты катионами Ca²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺; отчасти Al³⁺ и Fe³⁺. Эти элементы находятся в шестерной координации и не могут образовывать комплексных анионов с кислородом, и являются разрушителями сеток [66].

Такое представление о строении шлаков хорошо согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа шлаков, что также подтверждается данными об ионных потенциалах катионов (рис. 3.2) [124].

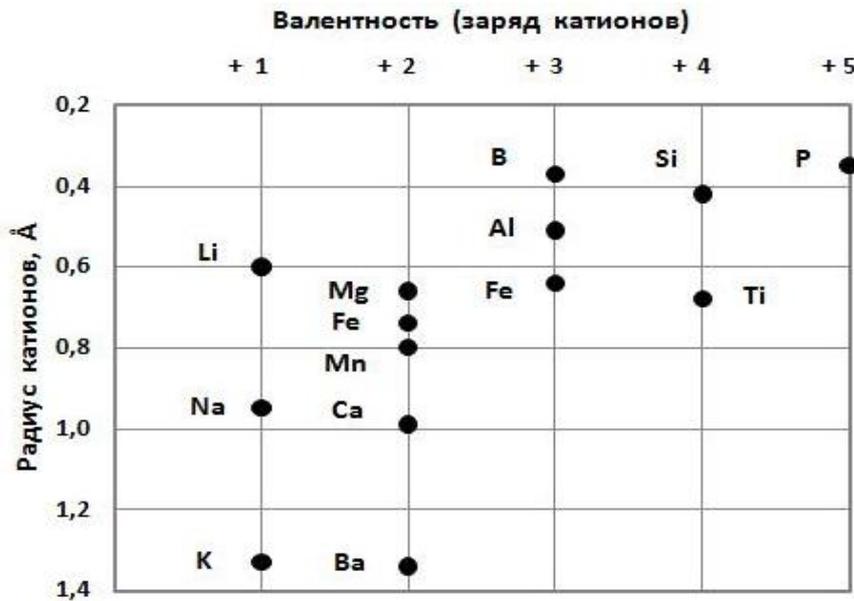


Рисунок 3.2 – Ионные потенциалы катионов шлакового расплава [124]

За основу в ПМ принимается подтверждённый факт, что реакции образования анионных комплексов-сеток (реакции полимеризации), являются определяющими физико-химические свойства металлургических шлаков, например [66, 125, 126]:



где, O^- – кислород, связанный с одним катионом кремния;

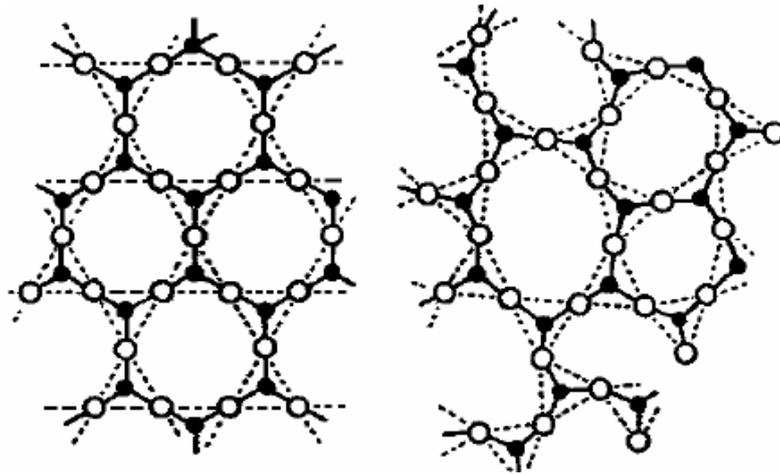
O^0 – кислород, связанный с двумя катионами кремния;

O^{2-} – кислород, не связанный с атомами кремния.

В жидкости или аморфном состоянии, дальний порядок исчезает, но ближний порядок остается неизменным. Ковалентные структуры обладают несколькими общими макроскопическими характеристиками:

- они очень тяжелые и трудные для деформации в твердом состоянии;
- связи остаются сильными в жидком состоянии.

Например, тетраэдры SiO_2 связаны друг с другом по углам и образуют трехмерную сеть. Исключив одну ковалентную связь, сеть может быть проиллюстрирована в двух измерениях, как представлено на рисунке 3.3.



SiO₂ в твердом состоянии (слева) и структуры SiO₂ в жидком состоянии (справа)
Рисунок 3.3 – Схематическое изображение кристаллической решетки [127]

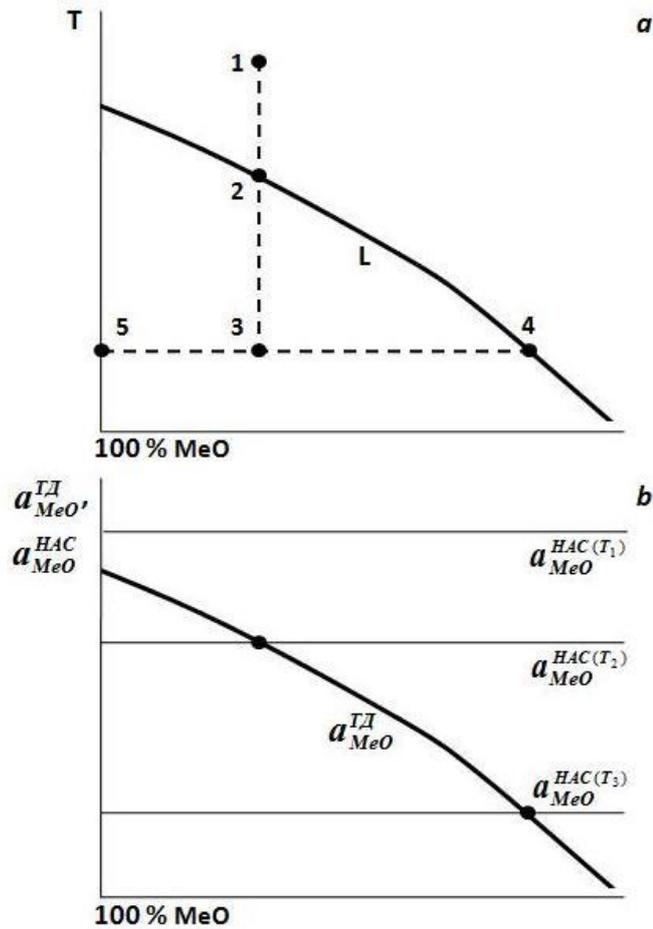
Поэтому вязкость расплавленных силикатов очень высока (рис. 3.3) [127].

Полимеризация характерна не только для силикатных систем, а также для алюминатных, ферритных, боратных и фосфатных [66]. Из представленного уравнения (3.10) видно, что полимерные анионные комплексы образуются из простых анионов за счет взаимодействия двух концевых ионов кислорода O⁻ с образованием одного мостикового (связанного с двумя атомами кремния) кислорода O⁰ и одного «свободного» аниона O²⁻ [3, 66, 125].

Полимерная модель, разработанная на кафедре «Теория металлургических процессов» УрФУ [66] позволяет рассчитать структурные и термодинамические характеристики бинарных силикатных расплавов и распространить уравнения на многокомпонентные оксидные расплавы, содержащие различные элементы-комплексообразователи.

Первой задачей необходимо рассчитать область гомогенизации поликомпонентных шлаковых расплавов, т.к. именно жидкая составляющая в наибольшей степени влияет на износ огнеупорных изделий.

Расчет свойств шлака проводили по полимерной модели (ПМ) шлаков – УрФУ [66]. Определение степени гетерогенности проводили по усовершенствованному алгоритму модели [128], позволяющему определять содержание в шлаке количество твердых частиц (рис. 3.4).



a – участок гипотетической диаграммы состояния бинарного расплава в координатах «состав» - «температура»; b – соотношение $a_{MeO}^{ТД}$ и $a_{MeO}^{НАС}$ в том же расплаве при изменениях температуры и состава расплава

Рисунок 3.4 – Принципиальная схема расчёта количества твёрдых частиц в гетерогенном шлаке и состава его жидкой фазы, иллюстрирующая аналогию с методикой расчётов по диаграммам состояния

В точке 1, расположенной выше линии ликвидус L , исходный расплав имеет соответствующие температуру и содержание оксида MeO . Степень приближения расплава к насыщению MeO в полимерной модели оценивается по соотношению двух параметров: термодинамической активности MeO в расплаве $a_{MeO}^{ТД}$, являющейся функцией состава расплава, и активности насыщения MeO $a_{MeO}^{НАС}$, являющейся функцией температуры T [66].

В точке 1, с соответствующей температурой T_1 , справедливо неравенство, свидетельствующее о ненасыщенности расплава MeO (рис. 3.4a и 3.4b):

$$a_{MeO}^{ТД} < a_{MeO}^{НАС(T_1)}, \quad (3.11)$$

При понижении температуры от точки 1 до точки 2 (не включая саму точку 2, лежащую на линии ликвидус L) происходит снижение a_{MeO}^{HAC} , однако a_{MeO}^{HAC} всё ещё превышает a_{MeO}^{TD} . В точке 2 активность насыщения MeO, определяемая температурой T_2 , достигает термодинамической активности MeO в расплаве, что свидетельствует о насыщении расплава MeO [66]:

$$a_{MeO}^{TD} = a_{MeO}^{HAC(T_2)}, \quad (3.12)$$

Если и при дальнейшем снижении температуры от точки 2 до точки 3 считать, что состав исходного расплава не изменяется (не снижается содержание MeO), то a_{MeO}^{TD} становится выше, чем, например, $a_{MeO}^{HAC(T_3)}$. Это говорит о том, что гомогенный расплав с исходным содержанием MeO при температурах ниже ликвидуса существовать не может. Поэтому при понижении температуры ниже ликвидуса начинается выделение MeO из гомогенного расплава в таких количествах, чтобы при каждой температуре соблюдалось равенство a_{MeO}^{TD} и a_{MeO}^{HAC} , т.е. при понижении температуры от точки 2 до точки 3 изменение состава гомогенного расплава происходит по линии 2-4 (рис. 3.4a).

Таким образом, методика определения количества нерастворённых кристаллов и состава жидкой фазы гетерогенного шлака состоит в следующем:

- определение минимальной температуры, при которой для всех компонентов шлака термодинамические активности не превышают активностей насыщения (определяется температура ликвидус);
- уменьшение содержания тех компонентов в расплаве, для которых по мере снижения температуры ниже ликвидуса a_{MeO}^{HAC} сравнивается с a_{MeO}^{TD} ; уменьшение содержания этих компонентов в расплаве производится таким образом, чтобы при каждой температуре a_{MeO}^{TD} была равна a_{MeO}^{HAC} (рассчитывается состав жидкой фазы гетерогенного шлака);
- определение массовой доли нерастворённых кристаллов по балансу компонентов исходного расплава при температуре ликвидус и состава жидкой фазы при его гетерогенизации.

С помощью выше изложенных рассуждений и варьируя концентрации оксидов CaO и MgO, рассчитываем составы шлаков, отвечающих их гомогенизации, т.е. условию $a_{MgO} = a_{MgO_{нас}}$, $a_{CaO} = a_{CaO_{нас}}$.

Расчет жидкой фазы шлака проводили по данным 820 плавков. Полученные результаты по составу жидкой фазы представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Состав жидкой фазы шлака на АКП, %

| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO |
|-------------------------------------|-----------|------------------|--------------------------------|---------|
| Минимальные и максимальные значения | 45,0-61,9 | 10,0-30,2 | 1,8-29,6 | 2,1-9,8 |
| Средние значения | 54,0 | 22,1 | 13,5 | 7,3 |

В таблице представлены средние рассчитанные значения оксидов, находящихся в гомогенной составляющей шлака. Для более детального представления о составе жидкой фазы большинства шлаков проведен частотный анализ, представленный в виде графиков (рис. 3.5-3.8).

Насыщение жидкой фазы шлака по содержанию CaO наблюдалось на 745 плавках, что составляет 91 % от обычного количества.

Насыщенность жидкой фазы шлака по содержанию MgO наблюдалось на 309 плавках, что составляет 38 % от обычного количества.

По расчетным данным, большинство металлургических шлаков являются гетерогенными.

Как видно из данных, представленных на графиках, основной массив шлаков имеет в гомогенной составляющей узкие пределы содержания основных оксидов. Особенно это ярко выражено по содержанию CaO. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что расхождения в рассчитанных составах жидкой фазы по всему отобранному массиву шлаков незначительны. Данные по разбегам представлены в таблице 3.9.

Таким образом, в конвертерном производстве ОАО «ЕВРАЗ НТМК» используются высокоосновные шлаки. Большинство рассматриваемых сталеплавильных шлаков являются гетерогенными. Насыщение жидкой фазы шлака по

СаО наблюдалось на 745 плавках, что составляет 91 %. Насыщенность жидкой фазы шлака по MgO наблюдалось на 309 плавках, что составляет 38 %.

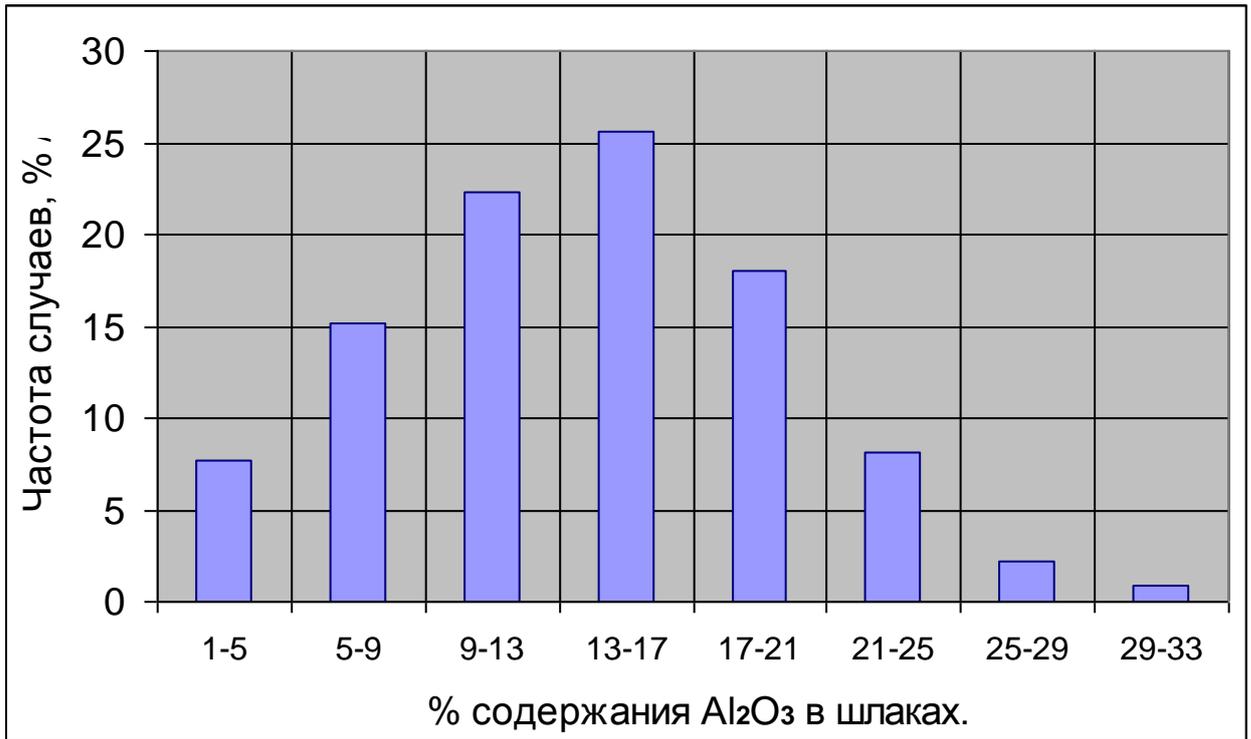


Рисунок 3.5 – Распределение содержания Al_2O_3 в жидкой фазе рассматриваемых шлаков

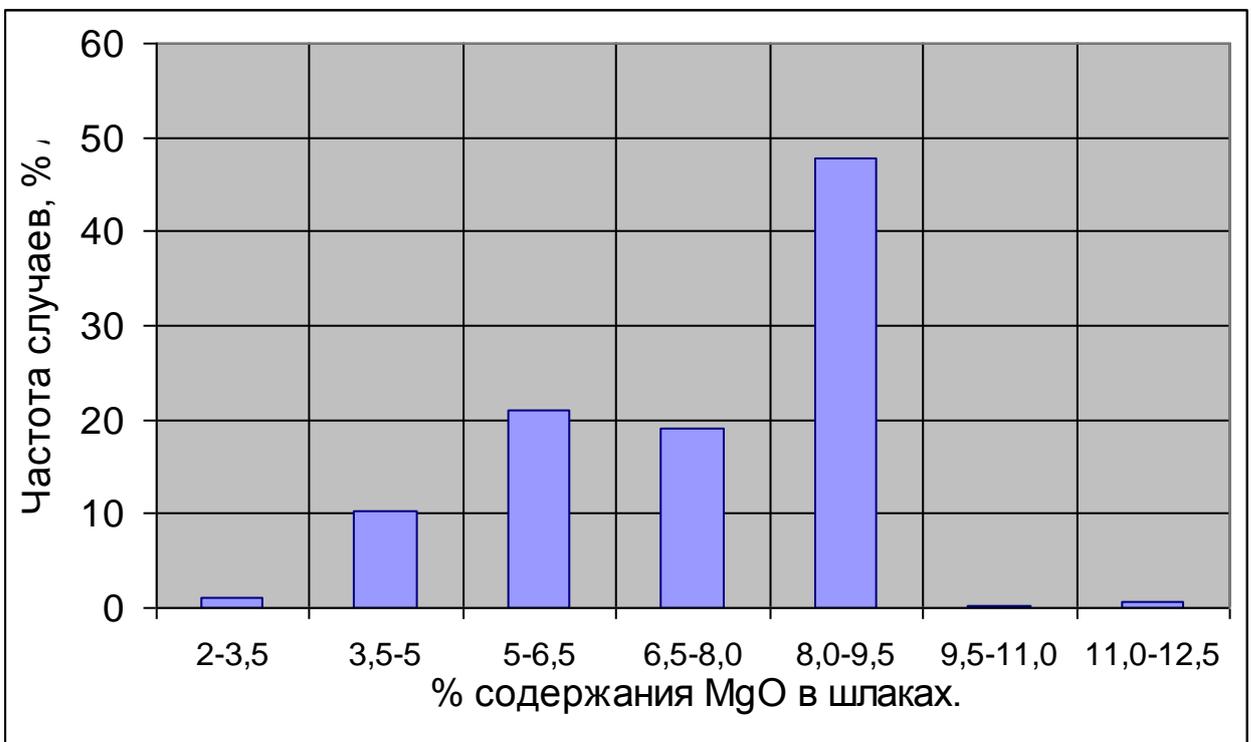


Рисунок 3.6 – Распределение содержания MgO в жидкой фазе рассматриваемых шлаков

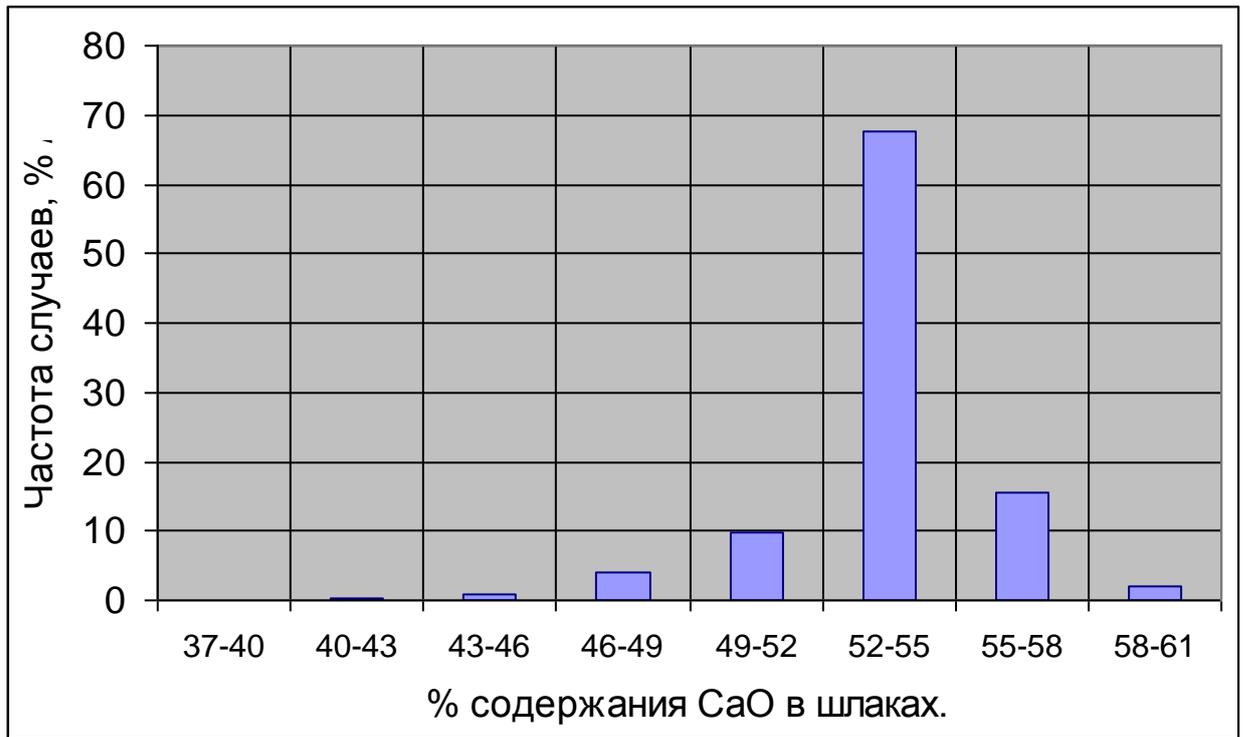


Рисунок 3.7 – Распределение содержания CaO в жидкой фазе рассматриваемых шлаков

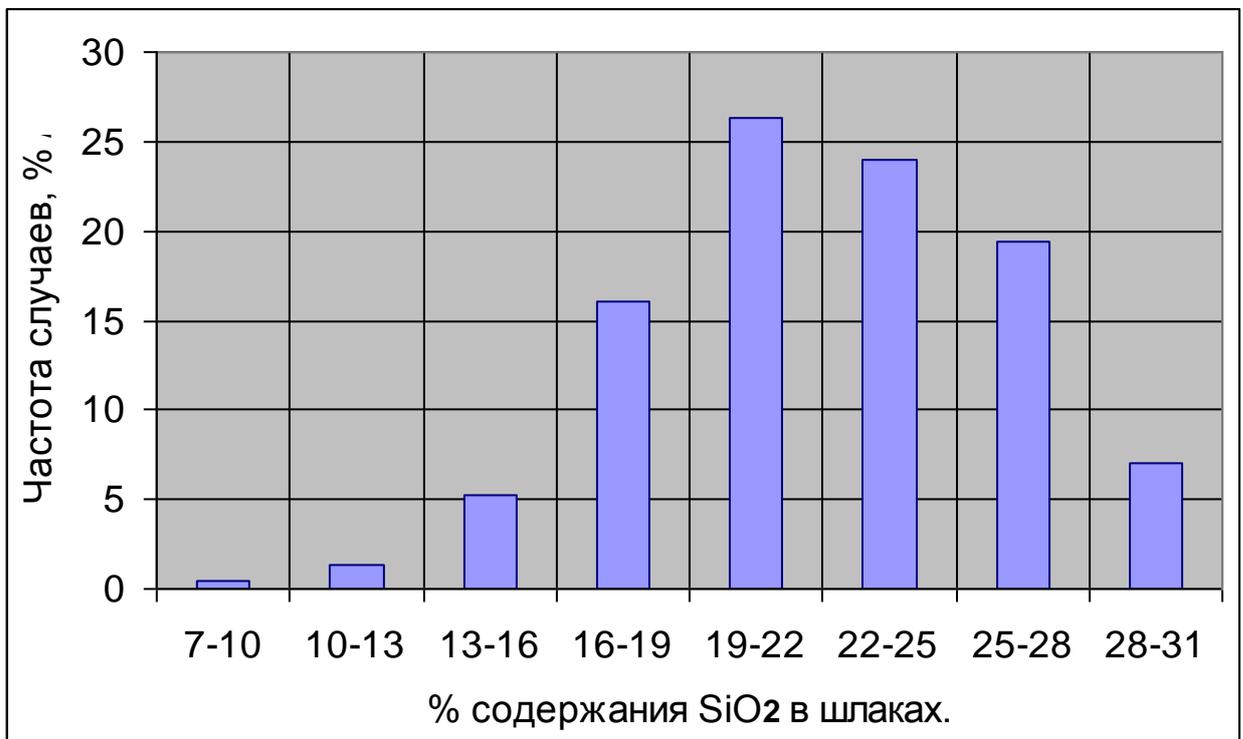


Рисунок 3.8 – Распределение содержания SiO₂ в жидкой фазе рассматриваемых шлаков

Таблица 3.9 – Основной объем содержания оксидов в исследуемых шлаках

| | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | SiO ₂ |
|--|--------------------------------|---------|-------|------------------|
| Содержание оксида в жидкой фазе шлака, % | 9-21 | 5,0-9,5 | 52-58 | 19-28 |
| Количество плавков с данным содержанием оксидов, % | 66 | 88 | 83 | 70 |

3.3 Исследование влияния гомогенной составляющей шлака на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий

Рассчитав, с помощью ПМ, состав жидкой фазы исследуемых шлаков целесообразно провести анализ влияния данного состава на износ стеновых изделий сталеразливочного ковша, т.к. по данным [55] примерно 2/3 всего количества огнеупоров разрушаются химическим путем – коррозией.

Для оценки влияния жидкой составляющей шлака на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий, из всего массива данных по стальковшам отобрали 11. Отбор проводили по удельному износу футеровки с 1 по 25 ряд в зоне подачи аргона. Четыре стальковша имели минимальный износ футеровки, четыре средний и четыре максимальный. Данные по среднему максимальному износу футеровки представлены в таблице 3.10.

Отобранные для анализа стальковши рассортировали по группам: первая группа – стальковши с минимальным износом (0,77 мм/плавку); вторая группа - со средним износом (0,98 мм/плавку) и третья группа - с максимальным износом футеровки (1,36 мм/плавку).

Первоначальной задачей было определение влияния основных компонентов шлака на износ футеровки сталеразливочных ковшей. Сравнительный анализ износа футеровки и состава шлака, используемого для обработки металла показал, что при различном содержании MgO в шлаке изменяется и скорость износа огнеупорных изделий. Минимальный износ футеровки отмечался на тех сталеразливочных ковшах, в которых для проведения рафинировочных процессов формировались шлаки с повышенным содержанием MgO (рис. 3.9).

Таблица 3.10 – Удельный минимальный износ футеровки в зоне подачи аргона отобранных сталеразливочных ковшей

| № п/п | № группы | № сталеразливочного ковша | Начало работы | Окончание работы | Стойкость, пл. | Средняя остаточная толщина, мм | Удельный износ, мм/пл. |
|-------|----------|---------------------------|---------------|------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
| 1 | 1 | 36 | 12.04.2009 | 13.05.2009 | 86 | 88,87 | 0,74 |
| 2 | 1 | 33 | 03.03.2010 | 28.03.2010 | 85 | 87,87 | 0,76 |
| 3 | 1 | 21 | 17.02.2010 | 19.03.2010 | 85 | 85,07 | 0,79 |
| 4 | 1 | 2 | 20.02.2010 | 14.03.2010 | 85 | 86,47 | 0,78 |
| 5 | 2 | 12 | 02.03.2010 | 10.04.2010 | 85 | 70,07 | 0,97 |
| 6 | 2 | 7 | 04.06.2009 | 22.07.2009 | 85 | 68,97 | 0,98 |
| 7 | 2 | 16 | 14.06.2010 | 23.07.2010 | 85 | 67,20 | 1,00 |
| 8 | 3 | 2 | 12.06.2010 | 15.07.2010 | 85 | 35,79 | 1,37 |
| 9 | 3 | 16 | 26.07.2010 | 07.09.2010 | 85 | 34,12 | 1,39 |
| 10 | 3 | 20 | 27.07.2010 | 26.08.2010 | 85 | 35,20 | 1,38 |
| 11 | 3 | 23 | 08.06.2010 | 12.07.2010 | 85 | 42,00 | 1,30 |

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для снижения удельного износа футеровки сталеразливочного ковша, необходимо повышать содержание MgO в шлаке, однако механизм износа не раскрыт, поэтому провели сравнение удельного износа футеровки агрегата по степени насыщения шлака по содержанию MgO (рис. 3.10).

Из данных, представленных на рисунке 3.10, видно, что минимальный износ наблюдался в сталеразливочных ковшах, в которых содержание MgO в шлаке находилось в интервале от 7,5 до 9,0 %. При этом из расчетных данных установлено, что содержание оксида магния, при котором происходит насыщение шлака в условиях участка КОС конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК», составляет от 8,50 до 9,05%. Таким образом, минимальный износ наблюдался на тех агрегатах

участка КОС, при выплавке сталей в которых использовались шлаки насыщенные по содержанию MgO.

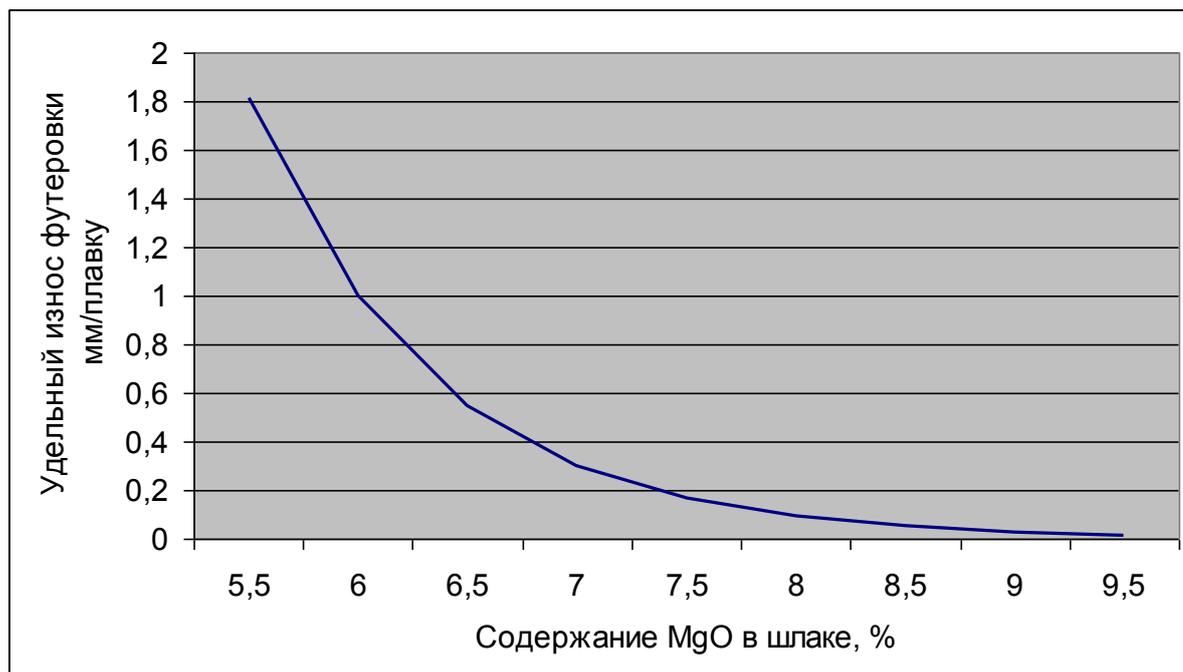


Рисунок 3.9 – Зависимость износа футеровки сталеразливочного ковша от содержания MgO в шлаке

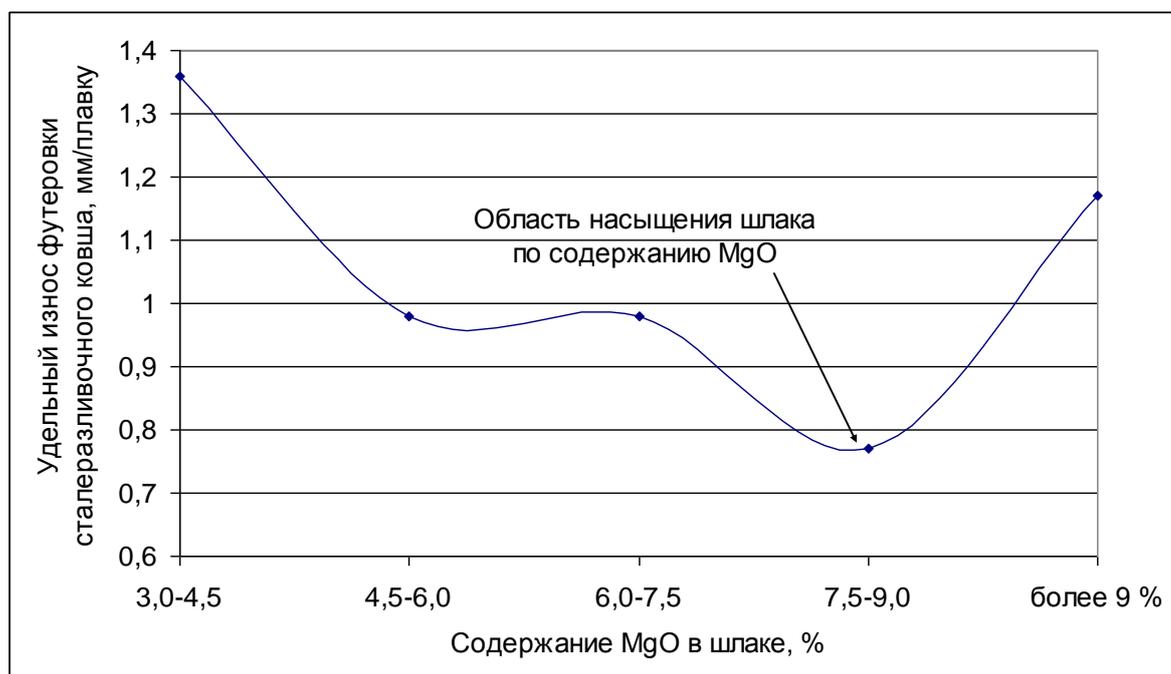


Рисунок 3.10 – Зависимость удельного износа футеровки стальнойковшей от насыщения шлаков по содержанию MgO

Исходя из проведенных исследований, можно отметить, что для снижения агрессивного воздействия шлака на футеровку стальнойковшей необходимо увеличи-

вать содержание в нем MgO до предела насыщенности, но не более, т.к. избыток MgO перейдет в твердую фазу с гетерогенизацией системы, что негативно отразится на рафинирующей способности шлака. По-видимому, именно с увеличением содержания MgO в шлаке более 9 % система становится гетерогенной. При разливке металла гетерогенный шлак недостаточно хорошо покрывает защитной корочкой огнеупор, тем самым стойкость футеровки снижается (рис. 3.10).

3.4 Оценка влияния насыщенности гомогенной составляющей шлака по содержанию MgO на износ футеровки

Оценка удельного износа огнеупорных изделий от количества разлитых на данном агрегате плавов с насыщенным по MgO шлаком представлен на рисунке 3.11

Математически, данная зависимость выражается логарифмическим уравнением (3.13) с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,75$ и представлена на рисунке 3.11:

$$Y = -29,8 \cdot \ln(x) + 39,68, \quad (3.13)$$

где, Y – средний удельный износ футеровки сталеразливочного ковша, мм/плавку;

x – % плавов обработанных шлаками с насыщением по содержанию MgO.

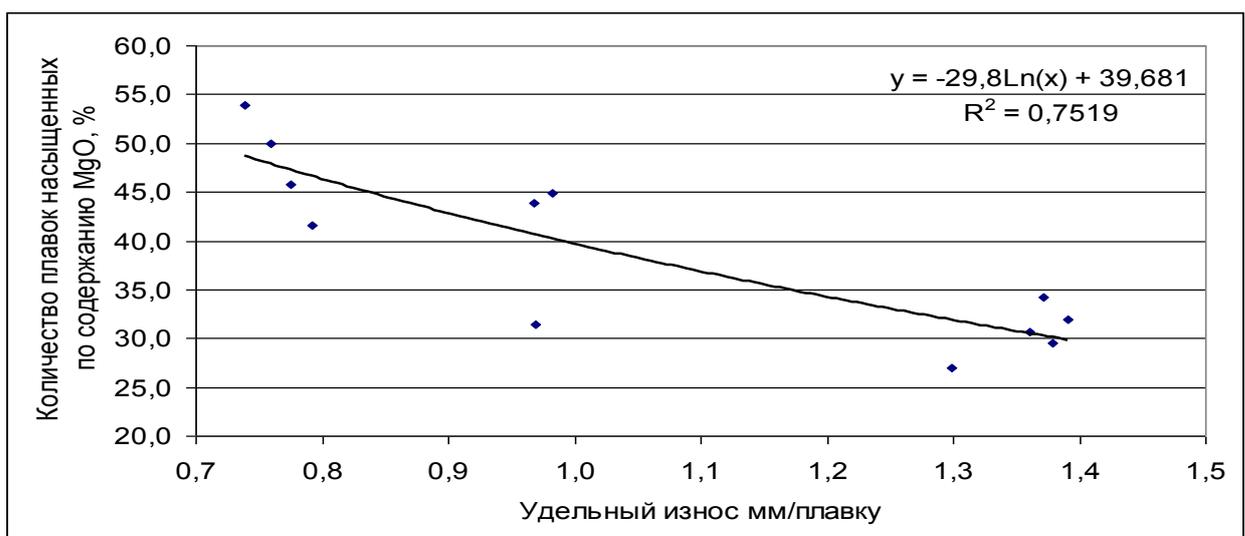


Рисунок 3.11 – Зависимость удельного износа футеровки сталковшей от количества разлитых плавов со шлаком насыщенным по содержанию MgO

Увеличивая количество плавов обработанных под шлаком, насыщенным по MgO, можно снизить удельный износ огнеупорных изделий в сталеразливочном ковше и, как следствие, повысить стойкость футеровки металлургического агрегата.

Исходя из проведенных исследований, можно отметить, что для снижения агрессивного воздействия шлака на футеровку стальной ковше необходимо увеличивать содержание в нем MgO до предела насыщенности, но не более, т.к. избыток MgO перейдет в твердую фазу с гетерогенизацией системы, что негативно отразится на рафинирующей способности шлака.

3.5 Определение рационального количества магнийсодержащих добавок

Для определения оптимального количества необходимых добавок в шлак MgO-содержащих материалов дополнительно исследовали массив плавов, который разделили на три группы: 1 – низкоуглеродистый металл; 2 – среднеуглеродистый металл; 3 – высокоуглеродистый металл. Для каждой группы рассчитывалось среднее содержание MgO в гомогенном шлаке [129, 130].

Для низко- и среднеуглеродистых марок стали среднее содержание MgO колеблется в пределах от 7 до 7,5 %. На таких марках стали для достижения насыщенности шлака по MgO, и как следствие, снижения его агрессивных свойств по отношению к материалу футеровки, необходимо повышать содержание MgO в шлаке на 1-1,5%, что соответствует 20-30 кг MgO, на плавку (при среднем весе шлака 2,35 тонны) [130].

На высокоуглеродистых марках стали среднее содержание MgO в гомогенной фазе шлака составляет 6,0-6,5 %. Необходимо повысить MgO на 2,0-2,5%, что соответствует 50-65 кг MgO [130].

Причиной различия пределов насыщения шлаков при обработке групп марок стали является, в основном, различие температур обработки – для низкоуглеродистых сталей они выше. Кроме того, играет роль различие состава шлака [130]:

- при выплавке низкоуглеродистого металла в ковш попадает больше окисленного конвертерного шлака;
- более значительный угар раскислителей при выплавке низкоуглеродистого металла приводит к большему поступлению оксидов кремния и алюминия в шлак, которые повышают растворимость в нем MgO.

Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением количества плавов, содержащих насыщенный по MgO шлак, удельный износ огнеупорных изделий уменьшается.
2. Для снижения агрессивного воздействия шлака на футеровку сталковшей необходимо увеличивать содержание в нем MgO до предела насыщенности, но не более, т.к. избыток MgO перейдет в твердую фазу, что связано с гетерогенизацией системы и негативно отразится на рафинирующей способности шлака и отрицательно повлияет на стойкость футеровки сталковша. Такие добавки составят: для низко- и среднеуглеродистых марок - 20-30 кг материала, содержащего 100% MgO, на плавку (при среднем весе шлака 2,35 тонны); для высокоуглеродистых марок стали - 50-65 кг материала, содержащего 100% MgO на плавку.

3.6 Определение рационального состава шлака на АКП конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

3.6.1 Выбор рациональных параметров шлаков, наводимых на АКП

При выборе рациональных параметров необходимо руководствоваться следующими положениями:

- шлак должен обладать хорошими рафинирующими свойствами;
- быть неагрессивным по отношению к футеровке сталеплавильных агрегатов, т.е. быть насыщенными по MgO.

Степень подвижности или обратная величина – вязкость шлака – важные показатели процесса взаимодействия шлака и металла, особенно когда скорость всего процесса определяется скоростью диффузии. Коэффициент диффузии и вязкость взаимосвязаны: $D \cdot \eta \approx \text{const}$, т.е. чем меньше вязкость шлака, тем интенсивнее происходит диффузия [2]. Для обеспечения хороших рафинирующих пока-

зателей шлак должен обладать низкой вязкостью. Таким требованиям отвечают гомогенные шлаки с низким содержанием твердой фазы [1, 131, 132].

Одним из важных показателей шлака, является его способность поглощать из металла вредную примесь – серу. Для повышения коэффициента распределения серы между шлаком и металлом – L_s (серопоглотительной способности шлака) необходимо повысить ионную долю кислорода в шлаке (основность шлака) и снизить содержание кислорода в металле (окисленность металла). Наиболее ценным компонентом шлака, способствующим образованию свободных анионов кислорода, является CaO , а главным поглотителем анионов кислорода – SiO_2 , поэтому для формирования хорошего рафинирующего шлака необходимо повышать в нем содержание CaO в гомогенной фазе.

Исходя из выше изложенного, можно установить следующие параметры для рафинирующего шлака:

- шлак должен обладать низкой вязкостью;
- высоким содержанием CaO и низким SiO_2 в гомогенной составляющей шлака;
- насыщенным по содержанию MgO .

3.6.2 Определение вязкости металлургических шлаков

Вязкость является важнейшей из динамических свойств. Повышенная вязкость затрудняет тепло- и массоперенос в шлаке, вызывает замедление всех процессов. Вязкость шлака зависит от его температуры и состава [133-135]. Значение вязкости нормальных шлаков находится в пределах 0,1-0,3 Па·с [1]. Жидкоподвижные шлаки имеют вязкость менее 0,1 Па·с. Вязкость густых шлаков может достигать 0,8-1,0 Па·с и более. Такая высокая вязкость характерна для кислых шлаков, насыщенных SiO_2 [1, 3, 135].

В практических условиях шлаки, как было показано в разделе 3.2, не являются гомогенными. Они содержат значительное количество нерастворившихся твердых частиц CaO и MgO , которые имеют высокую температуру плавления. Поэтому часто применяют термин «кажущаяся вязкость». Для оценки степени

подвижности реальных промышленных шлаков используют термин жидкоподвижность или жидкотекучесть.

Для текущего контроля текучести шлака применяют различные типы вискозиметров [136]:

- «Вискозиметр» Герти (рис. 3.12);
- «Вискозиметр погружения» (рис. 3.13).

«Вискозиметр» Герти представляет собой разъемный на 2 части стальной брусок с воронкой и горизонтальным каналом длиной (L) 250-300 мм и диаметром (D) 6,4-9,0 мм. В воронку быстро заливают жидкий шлак. Длина затекшей и застывшей в канале струи шлака характеризует жидкоподвижность шлака (табл. 3.11) [136].

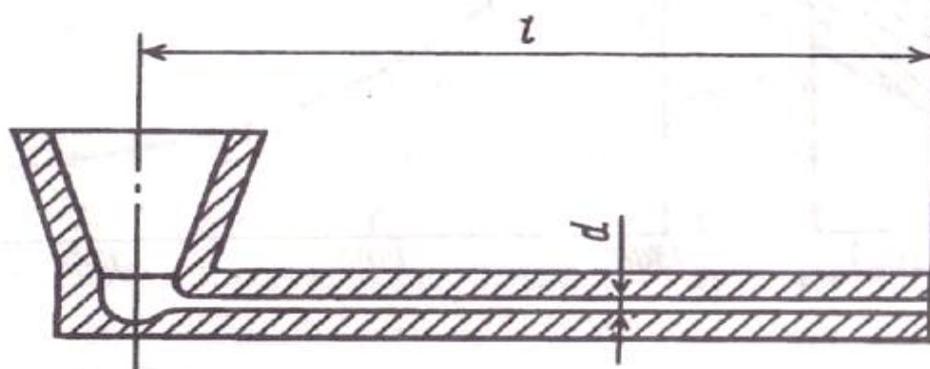
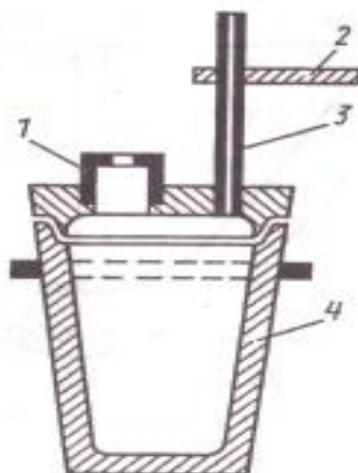


Рисунок 3.12 – Вискозиметр Герти



1 – тигель с отверстием 9 мм; 2 – шайба для определения глубины погружения стакана; 3 – трубка для выхода воздуха; 4 – стакан

Рисунок 3.13 – Вискозиметр погружения

Таблица 3.11 – Определение жидкоподвижности шлака по длине затекшей и застывшей в канале струи шлака

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Жидкотекучесть шлака | L, мм при D=6,4 мм |
| Пониженная (густой шлак) | 0-50 |
| Нормальная | 100-150 |
| Повышенная | 180 и более |

По мнению авторов работы [136], этот метод не достаточно точно характеризует текучесть шлака, так как длина пробега зависит от многих факторов (скорости кристаллизации, места отбора, прогрева ложки, быстрота слива шлака в воронку прибора).

Жидкоподвижность шлака, измеренная с помощью «Вискозиметра погружения» дает более точные результаты [137]. В промышленных условиях прибор погружают на 10 секунд в шлак до уровня шайбы для создания постоянного напора жидкого шлака. Перед погружением прибор прогревают. Жидкотекучесть шлака характеризуется количеством затекшей массы в стакан (г/5 с) через отверстие тигелька постоянного диаметра.

Примерные значения текучести шлака при диаметре отверстия в тигельке 9 мм представлены в таблице 3.12 [136].

Таблица 3.12 – Значения текучести шлака при измерении с помощью «Вискозиметра погружения»

| Шлак | Густой | Нормальный | Жидкоподвижный |
|-----------------|--------|------------|----------------|
| Количество г/5с | 50-100 | 150-200 | 250 и более |

Практические способы оценки вязкости шлака применимы только на практике в заводских условиях. Обслуживающий персонал (сталевар или его помощник) на основании полученных данных принимают решение о необходимых добавках в шлак для проведения рафинирующих процессов.

Данные методы весьма неточны и использование их для теоретической оценки вязкости промышленных шлаков не целесообразно.

3.6.3 Теоретическое определение вязкости реальных, сталеплавильных шлаков

В теории под вязкостью жидкости понимают внутреннее трение, возникающее между отдельными её слоями бесконечно малой толщины, перемещающимися с различными скоростями [132-134]. Вязкость характеризует силу сопротивления P , которое оказывает один слой жидкости параллельному движению другого при наличии между ними градиента скорости dv/dx и площади контакта S [132]:

$$P = -\eta \cdot (dv/dx) \cdot S, \quad (3.14)$$

В выражении (3.14) величина η применима только для данного типа жидкости и называется коэффициентом внутреннего трения или динамической вязкостью. Значения динамической вязкости могут быть получены экспериментально с использованием специальных приборов (вискозиметров). Следует иметь виду, что в специальной литературе приводятся данные о вязкости шлаков, полученных экспериментально, исследователями, использовавшими различные методики. Данные могут существенно различаться, иногда очень сильно [2]. Исследователи, определяя в стационарных условиях значения вязкости шлаков, принимают специальные меры для обеспечения возможно более полной гомогенизации шлакового расплава, выдерживая его длительное время в жидком виде, так как вязкость в значительной степени зависит от его однородности.

Известно, что при появлении твёрдой фазы в объёме жидкости, значения её вязкости, которые получены экспериментально, могут отличаться, т.к. не отражают характера межчастичного взаимодействия в жидкости и, поэтому, не являются вязкостью согласно (3.14). Свойство гетерогенной жидкости, в нашем случае шлаков, замедлять движение находящихся в ней тел, называют кажущейся вязкостью [132, 138].

Вязкость шлака зависит от его гетерогенизации. В литературе этот факт объяснен не достаточно [132, 133, 138]. В тоже время, в теоретической и прикладной физике введено понятие вязкости суспензий, снимающее многие затруднения [139-142].

Возможность количественной оценки вязкости суспензий, а также расчёта по наличию в ней количества твёрдых частиц и вязкости её жидкой фазы дано Я. Френкелем [134].

По теории Я. Френкеля можно сказать, что сопротивление движению находящихся в жидкой среде тел может равновероятно вызываться как повышенной вязкостью гомогенной жидкости, так и нарушением равномерного распределения градиента скорости в ней при гетерогенизации. Экспериментально проявляющиеся свойства вязкости гомогенной жидкости и суспензии имеют только одно принципиальное различие – вязкость суспензии не позволяет судить о характере межчастичного взаимодействия в её жидкой фазе. Это даёт возможность сопоставления вязкости гомогенной жидкости и эффективной вязкости суспензий, если преследуется цель сравнения их вязкостных свойств [143,144].

Вопрос о вязкости гетерогенных шлаков был детально изучен в ряде работ [128, 131, 143, 144]. За основу данных работ были взяты труды ряда зарубежных исследований [145, 146], в которых обсуждалась возможность применения уравнения Эйнштейна (3.15).

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + 2,5 \cdot \varepsilon), \quad (3.15)$$

где, η – вязкость суспензии;

η_0 – вязкость жидкой фазы суспензии;

ε – объёмная доля твёрдых частиц.

В работе [145] сопоставляя опытные значения вязкости гетерогенного шлака с расчетными, было отмечено удовлетворительное соответствие опытных данных и результатов расчетов по уравнению (3.16)

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - \varepsilon)^{-2,5}, \quad (3.16)$$

Приняли формулу (3.16) за основу определения вязкости гетерогенных шлаков. Однако для определения вязкости гетерогенных шлаков необходимо знать вязкость его гомогенной составляющей.

3.6.4 Выбор модели для определения вязкости гомогенной составляющей шлака

Вязкость бинарных силикатных расплавов, по мнению авторов [66, 126], связана со средним числом тетраэдров в комплексном кремнекислородном анионе:

$$\frac{dn}{n} = K_n \frac{d\bar{i}}{\bar{i}}, \quad (3.17)$$

где, K_n – коэффициент пропорциональности.

Проинтегрировали уравнение (3.17) и получили:

$$\ln \eta = A_\eta + \frac{E_\eta}{R \cdot T} + K_n \cdot \ln \bar{i}, \quad (3.18)$$

где, A_η – предэкспоненциальный множитель;

E_η – энергия активации;

\bar{i} – средний размер комплексного аниона.

Значение \bar{i} рассчитали по формуле [66]:

$$\bar{i} = \frac{1}{1 - \alpha}, \quad (3.19)$$

где, α – степень полимеризации.

Значения K_n , A_η и E_η для бинарных систем приведены в таблице 3.13 [66].

Таблица 3.13 – Значение параметров используемых для расчета вязкости металлургических шлаков

| Система | A_η , (Па·с) 10 | E_η , Дж/моль | K_n |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------|-------|
| CaO – SiO ₂ | -13 | 187500 | 2,6 |
| MgO – SiO ₂ | -13 | 160000 | 2,6 |
| MnO – SiO ₂ | -6 | 58700 | 3,75 |
| FeO – SiO ₂ | -6,5 | 61000 | 3,0 |
| CaO – Al ₂ O ₃ | -6,0 | 120400 | 2,0 |
| MgO – Al ₂ O ₃ | -6,0 | 160000 | 2,0 |
| FeO – Al ₂ O ₃ | -5,5 | 63000 | 4,0 |

Реальные металлургические шлаки представляют собой многокомпонентные оксидные расплавы, для расчета вязкости которых согласно данным [66] не-

обходимо ввести понятие средних значений \bar{K}_n , \bar{A}_η , \bar{E}_η уравнениями которые представлены ниже:

$$\begin{aligned} (\bar{A}_\eta, \bar{E}_\eta, \bar{K}_\eta) = & \frac{N_{SiO_2}}{N_{SiO_2} + N_{Al_2O_3}} \cdot \left\{ \left(\frac{N_{CaO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{CaO-SiO_2} + \frac{N_{MgO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{MgO-SiO_2} + \right. \right. \\ & + \left. \frac{N_{FeO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{FeO-SiO_2} \right\} + \frac{N_{Al_2O_3}}{N_{SiO_2} + N_{Al_2O_3}} \cdot \left[\left(\frac{N_{CaO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{CaO-Al_2O_3} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{N_{MgO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{MgO-Al_2O_3} + \frac{N_{FeO}}{N_{CaO} + N_{MgO} + N_{FeO}} (A_\eta, E_\eta, K_\eta)_{FeO-Al_2O_3} \right] \right], \end{aligned} \quad (3.20)$$

Вязкость гомогенной составляющей находилась в пределах от 0,04 до 0,40 Па·с.

По данным [66] было отмечено, что уменьшение вязкости более чем на порядок происходит одновременно с увеличением содержания в шлаке SiO_2 и Al_2O_3 . Это противоречит экспериментальным данным по вязкости гомогенных алюмосиликатных расплавов и является еще одним подтверждением того, что снижение вязкости обусловлено гомогенизацией расплавов. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения ПМ для прогнозирования областей гомогенизации поликомпонентных металлургических шлаков [66].

Противоречие экспериментальным данным по вязкости гомогенных алюмосиликатных расплавов ставят под сомнение использование данной модели для определения вязкости реальных металлургических шлаков.

В конвертерном цехе выплавляется широкий спектр марок сталей с большим разбегом, как по содержанию углерода, так и легирующих добавок. Температура в зависимости от марки стали так же варьируется в широких интервалах.

Для выплавки такого сортамента стали наводятся различные по химическому составу шлаки, поэтому модель определения их вязкости должна учитывать:

- широкий разбег по химическому составу компонентов шлака;
- большой интервал температур, в которых модель, будет адекватно описывать вязкость шлаков.

По данным работы [147], в которой рассмотрены и оценены модели определения вязкости шлаков различных авторов, таких как Urbain, Streeter, Wall-Fereday, показано, что они не точно описывают вязкость реальных металлургиче-

ских шлаков. Большинство моделей выше перечисленных авторов оптимизированы под конкретный состав шлака, поэтому точно определить вязкость шлака можно только в небольшом интервале его компонентов [148].

Из современных моделей, описывающих вязкость многокомпонентных шлаков, наиболее точно и в широких интервалах, как по химическому составу, так и по температуре удовлетворяет требованиям модель разработанная Кондратьевым (А. Kondratiev) в Австралийском University of Queensland [148]. Поэтому целесообразно для определения вязкости шлаков, формируемых на АКП в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК» использовать модель Кондратьева.

В основу работ Кондратьева по определению вязкости системы оксидов Al_2O_3 -CaO-FeO-SiO₂, взята теория Френкеля [134], согласно которой вязкость жидкости или обратная ее величина – текучесть, определяется двумя факторами: способностью структурных подразделений перескакивать потенциальный барьер и наличия отверстий в жидкости. В [134] Френкель подчеркивает, что в общем случае величина потенциального барьера зависит от влияния ионов каждого знака как друг на друга, так и на ионы противоположного знака, т.е. потенциальный барьер, зависит от характера и эффекта взаимодействия между различными ионами, которые составляют жидкость. Наличие пустот (дырок) в жидкости, Френкель связывает с энергией их образования [134].

Исходя из выше представленных постулатов жидкого состояния и вязкости жидкости, первоначально сформулированных Френкелем и Айрингом в работах [134, 149] были получены уравнения вязкости жидкости. Айринг предположил, что вязкое течение – это термодинамически активный кинетический процесс, в котором структурные подразделения (атомы или молекулы в простых жидкостях) переходят из одного равновесного положения в другое, перепрыгивая через потенциальный барьер. Тогда усилие сдвига для двух слоев структурных подразделений, скользящих относительно друг друга под действием приложенной силы, можно описать следующим уравнением [147-149]:

$$\eta = \frac{2 \cdot R \cdot T}{\Delta E_{vap}} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_{SU} \cdot k \cdot T}}{\sqrt[3]{v_{SU}^2}} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (3.21)$$

где, R – газовая постоянная;

k – постоянная Больцмана;

E_{vap} – энергия испарения;

m_{SU} – вес структурного подразделения;

v_{SU} – объем структурного подразделения;

E_a – энергия активации.

Для того чтобы описать вязкость по формуле 3.20 необходимо определить массу и объем структурных подразделений, а также энергию испарения и энергию активации.

Средний молекулярный вес m_{SU} и объем структурных единиц в двоичной системе MeO-SiO₂, могут быть выражены через концентрацию различных структурных подразделений в расплаве по следующим формулам [150]:

$$m_{SU} = m_{Si-Si} \cdot X_{Si-Si} + m_{Me-Si} \cdot X_{Me-Si} + m_{Me-Me} \cdot X_{Me-Me}, \quad (3.22)$$

$$v_{SU} = v_{Si-Si} \cdot X_{Si-Si} + v_{Me-Si} \cdot X_{Me-Si} + v_{Me-Me} \cdot X_{Me-Me}, \quad (3.23)$$

где, m_{Si-Si} , v_{Si-Si} и X_{Si-Si} ; m_{Me-Si} , v_{Me-Si} , и X_{Me-Si} , а также m_{Me-Me} , v_{Me-Me} и X_{Me-Me} – веса, объемы и мольные доли (Si-Si), (Me-Si) и (Me-Me) структурных единиц, соответственно.

Общую молярную энергию активации можно считать пропорциональной парциальной мольной энергией активации и концентрации каждого типа структурного подразделения [147, 150]. По их выводам в двоичной системе MeO-SiO₂ молярная энергия активации может быть выражена следующим образом:

$$E_a = E_{a,Si-Si} \cdot X_{Si-Si} + E_{a,Me-Si} \cdot X_{Me-Si} + E_{a,Me-Me} \cdot X_{Me-Me}, \quad (3.24)$$

где, $E_{a,Si-Si}$, $E_{a,Me-Si}$, $E_{a,Me-Me}$ – парциальные мольные энергии активации соответственно;

X_{Si-Si} , X_{Me-Si} , X_{Me-Me} – мольные доли каждого типа структурного подразделения, соответственно.

Структурное подразделение включает в себя один атом кислорода и два катиона металла. Каждый из этих двух катионов металла, в свою очередь, участвует в других структурных единицах. Предполагается, что существует взаимосвязь

между структурными подразделениями. Например, если два катиона Si сформировали структурное подразделение (Si-Si) с другими катионами металлов (рис. 3.14а), то они будут иметь другую молярную энергию активации по сравнению со случаем, когда некоторые или все другие соседи состоят из катионов кремния (рис. 3.14б и 3.14в) [147, 150].

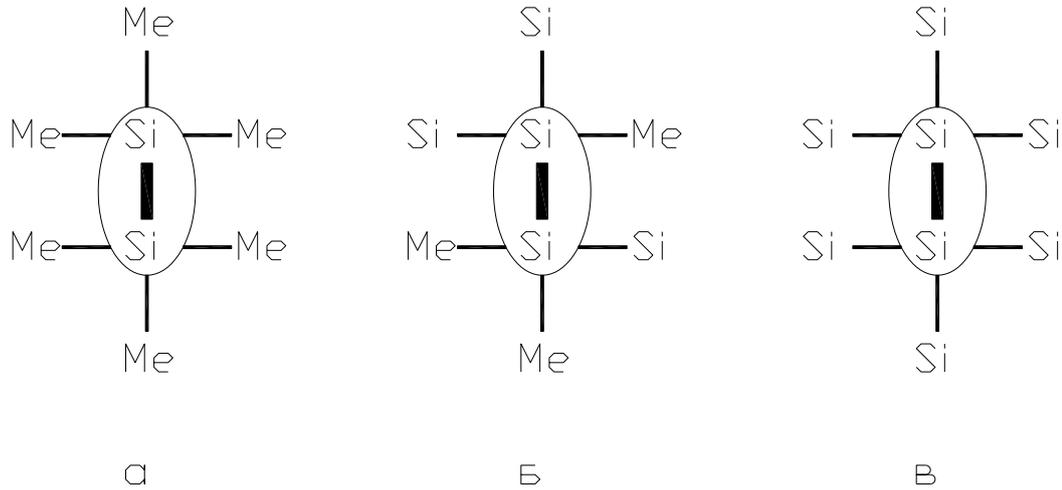


Рисунок 3.14 – Примеры различных ближайших соседей структурного подразделения (Si-Si)

Влияние соседних структурных подразделений на энергию активации зависит от концентрации других типов структурных подразделений, поэтому парциальная молярная энергия активации каждого типа структурного подразделения в уравнении (3.24) может быть выражена следующим образом [147, 150]:

$$\begin{aligned}
 E_{a, Si-Si} &= E_{a, Si-Si}^0 + E_{a, Si-Si}^{Si-Si,1} \cdot X_{Si-Si} + E_{a, Si-Si}^{Si-Si,2} \cdot X_{Si-Si}^2 + \\
 &+ E_{a, Si-Si}^{Me-Si} \cdot X_{Me-Si},
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
 E_{a, Me-Si} &= E_{a, Me-Si}^0 + E_{a, Me-Si}^{Me-Si,1} \cdot X_{Me-Si} + E_{a, Me-Si}^{Si-Si,2} \cdot X_{Si-Si} + \\
 &+ E_{a, Me-Si}^{Me-Me} \cdot X_{Me-Me},
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
 E_{a, Me-Me} &= E_{a, Me-Me}^0 + E_{a, Me-Me}^{Me-Me} \cdot X_{Me-Me} + \\
 &+ E_{a, Me-Me}^{Me-Si} \cdot X_{Me-Si},
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

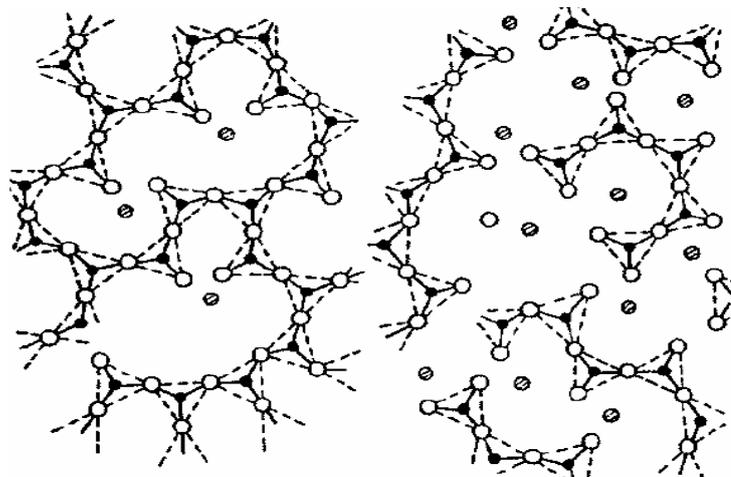
Обширный анализ экспериментальных данных для ряда силикатных систем показывает, что адекватное описание E_{vap} , в зависимости от различных мольных долей структурных единиц может быть выражено следующей формулой [147, 150]:

$$\Delta E_{vap} = \exp \left(\begin{aligned} &E_{v,Si-Si} \cdot X_{Si-Si} + E_{v,Me-Si} \cdot X_{Me-Si} + \\ &+ E_{v,Me-Me} \cdot X_{Me-Me} \end{aligned} \right), \quad (3.28)$$

где, $E_{v,Si-Si}$, $E_{v,Me-Si}$ и $E_{v,Me-Me}$ – частные энергии испарения каждого типа структурного подразделения;

X_{Si-Si} , X_{Me-Si} и X_{Me-Me} – мольные доли соответствующих видов структурных подразделений.

Таким образом, по уравнениям (3.21) – (3.28) можно определить вязкость гомогенной составляющей шлака. Вязкость гомогенной составляющей находится в пределах от 0,038 до 0,091 Па·с. При определении вязкости были выявлены некоторые закономерности, которые хорошо согласуются с общепринятым мнением. Например, с повышением содержания магния в гомогенной составляющей шлака, вязкость снижается, так как он находится в шестерной координации по кислороду, и является модификатором [66]. Данный элемент не может образовать комплексных анионов с кислородом и является разрушителем полимерных сеток SiO_2 (рис. 3.15) [66, 132].



а

б

● – атом кремния; ○ – атом кислорода; ○ – атом металла.

Доля основных оксидов выше в шлаке (б), чем в (а)

Рисунок 3.15 – Структура шлака

Модель показывает, что с повышением содержания SiO_2 в гомогенной составляющей вязкость шлака возрастает, что хорошо согласуется с рядом авторитетных источников [1, 3, 66, 147]. Вязкость гомогенной составляющей шлака также зависит от основности, с повышением основности вязкость снижается (рис 3.16).

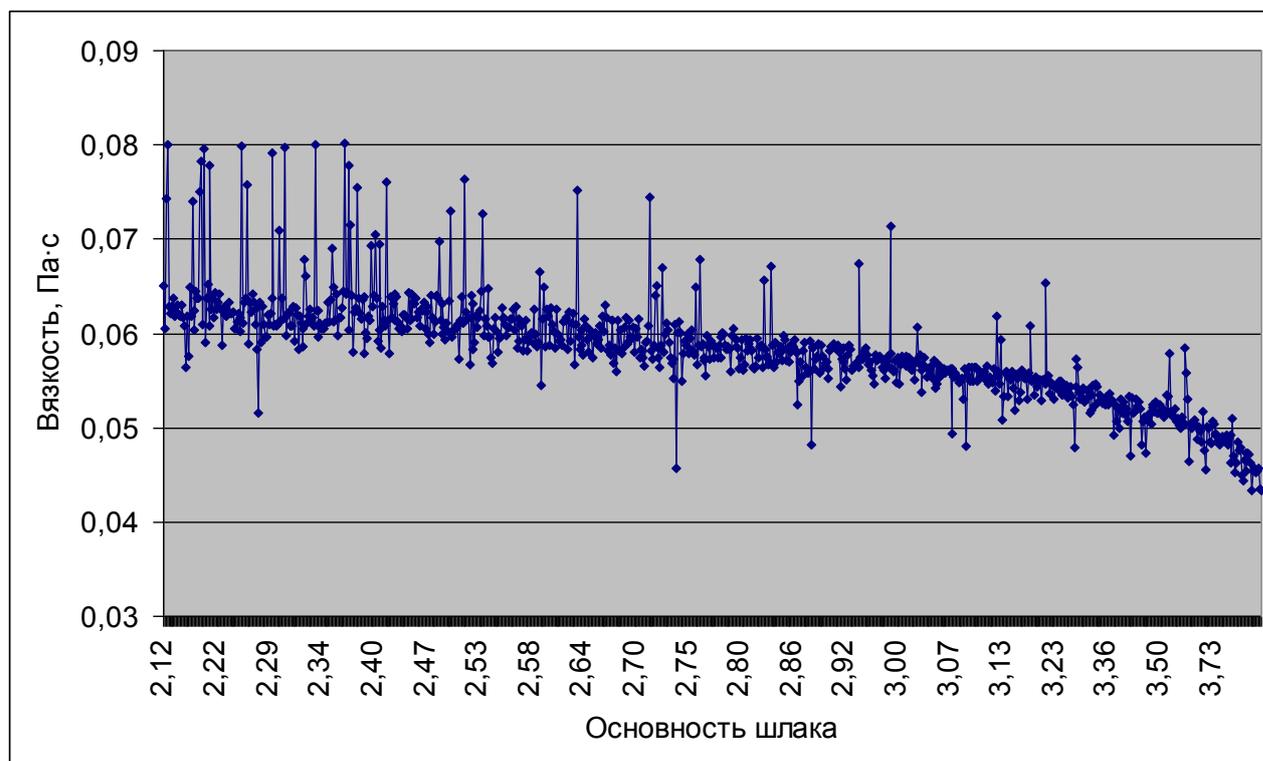


Рисунок 3.16 – Зависимость вязкости гомогенной составляющей шлака от основности, с повышением основности вязкость снижается

3.6.5 Определение вязкости гетерогенных шлаков

По уравнению (3.15) рассчитали вязкость промышленных шлаков с учетом степени гетеронизации. Для более детального представления о вязкости гетерогенных шлаков, наводимых на АКП в конвертерном цехе, проведен частотный анализ. Полученные данные выражены в виде графика (рис. 3.17).

Из данных, представленных на рисунке 3.18 видно, что менее 27% шлаков наводимых на АКП имеют вязкость менее 0,1 Па·с, т.е. по данным [1] они являются жидкоподвижными; 34% шлаков имеют нормальную вязкость 0,1-0,3 Па·с. Вязкость густых шлаков (более 0,3 Па·с) составляет 39% от общего количества [1].

Повышенной вязкостью обладает чаще всего гетерогенный шлак [1].

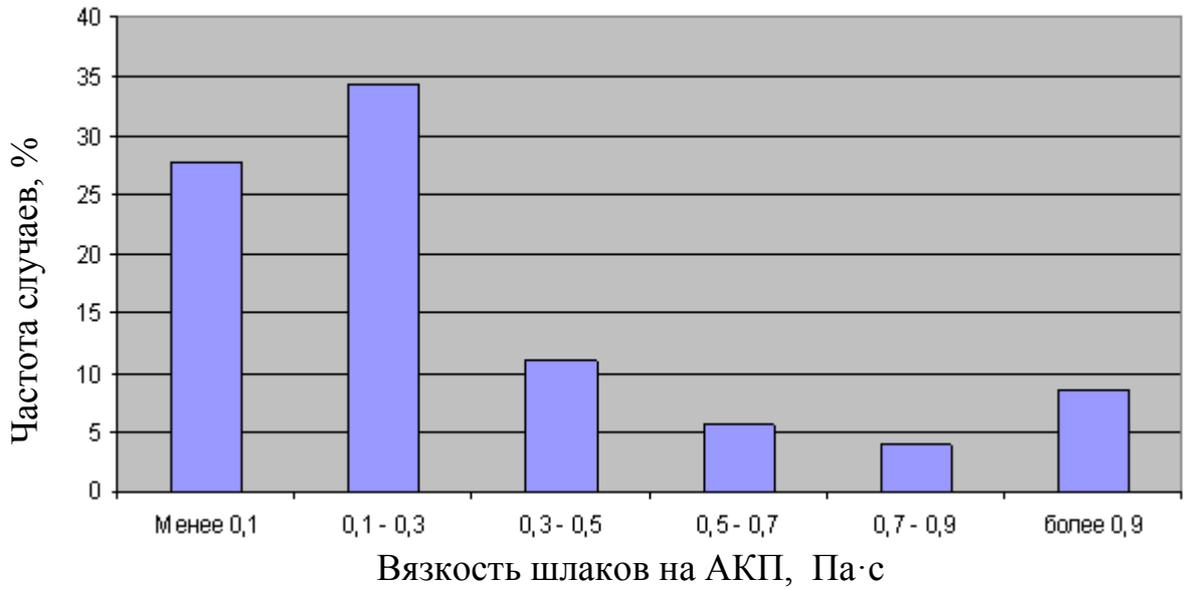


Рисунок 3.17 – Распределение вязкости металлургических шлаков

Зависимость вязкости шлака от количества нерастворенных частиц представлена на рисунке 3.18.

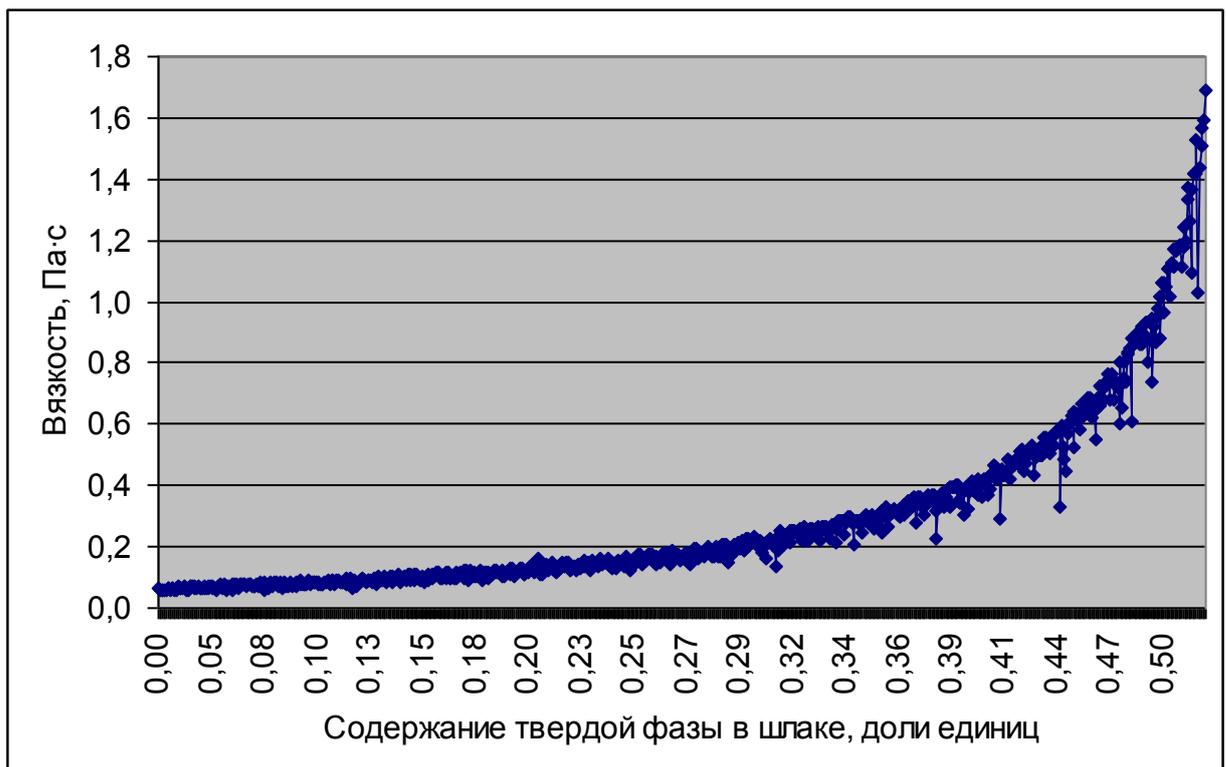


Рисунок 3.18 – Зависимость вязкости шлака от содержания в нем твердой фазы

Из представленных данных видно, что при содержании в шлаке твердой фазы более 35 % от общей массы его вязкость составляет более 0,3 Па·с, что соответствует густым шлакам.

Из расчетов видно, что вязкость гетерогенных шлаков удовлетворительно описываются уравнениям 3.15 [143, 144].

Рафинирующий шлак с низкой агрессивностью к футеровке металлургических агрегатов должен обладать [1]:

- низкой вязкостью;
- высоким содержанием CaO;
- низким содержанием SiO₂;
- быть насыщенным по MgO.

Таким образом, определив критерии оценки шлака и инструмент расчета этих критериев можно подобрать рациональный состав шлака.

3.6.6 Выбор оптимальных параметров шлака наводимого на АКП

3.6.6.1 Пределы насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO в зависимости от его состава

С целью моделирования состава шлака использовали ПМ, которая была разработана в УрФУ, для оценки предела насыщения шлака по CaO и MgO, при различных вариациях содержания в шлаке SiO₂ и Al₂O₃. Это позволило оценить изменение количества твердой фазы в шлаке, и как следствие вязкости и агрессивности шлака к футеровке металлургических агрегатов.

Определение степени гетерогенности проводили по усовершенствованному в ИМЕТ УрО РАН алгоритму модели [143, 144]. Данный алгоритм был представлен выше.

Степень насыщения гомогенной составляющей по MgO находится в определенной области и имеет границы, которые зависят от содержания CaO, SiO₂ и Al₂O₃. Область насыщения по MgO представлена на рисунке 3.19.

Нижний предел насыщения гомогенной составляющей по MgO, при заданном содержании SiO₂ и Al₂O₃, ограничен пределом растворимости в шлаке CaO, т.е. при повышении содержания CaO в шлаке выше определенного значения насыщения, избыток оксидов MgO и CaO перейдет в гетерогенную фазу. Увеличение в шлаке гетерогенной фазы не желательно, т.к. это отразится на его вязкости и рафинирующей способности [1]. При понижении содержания CaO, при задан-

ном содержании SiO_2 и Al_2O_3 , насыщение гомогенной составляющей шлака MgO не достигается, и как следствие, увеличивается агрессивность шлака по отношению к огнеупорным изделиям. Нижний предел насыщения гомогенной составляющей шлака MgO в зависимости от насыщения CaO и содержания SiO_2 и Al_2O_3 представлен в таблице 3.14 и на рисунке 3.20.

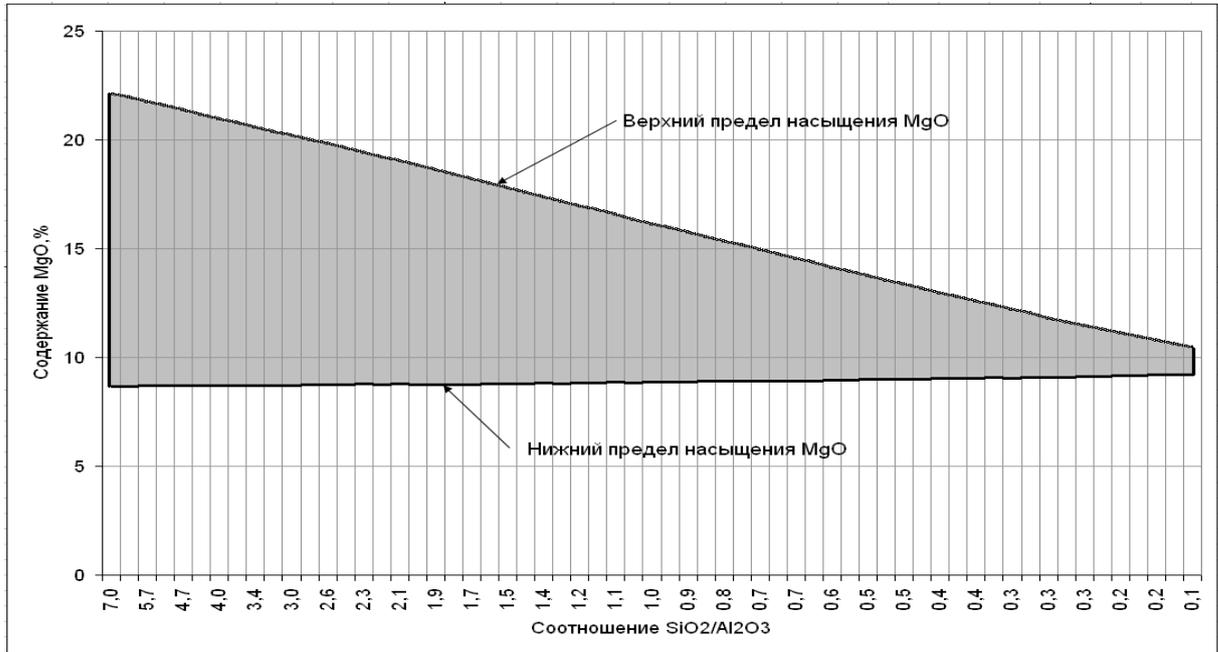


Рисунок 3.19 – Область предела насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO в зависимости от содержания оксидов SiO_2 и Al_2O_3 , при шлаке насыщенном по CaO

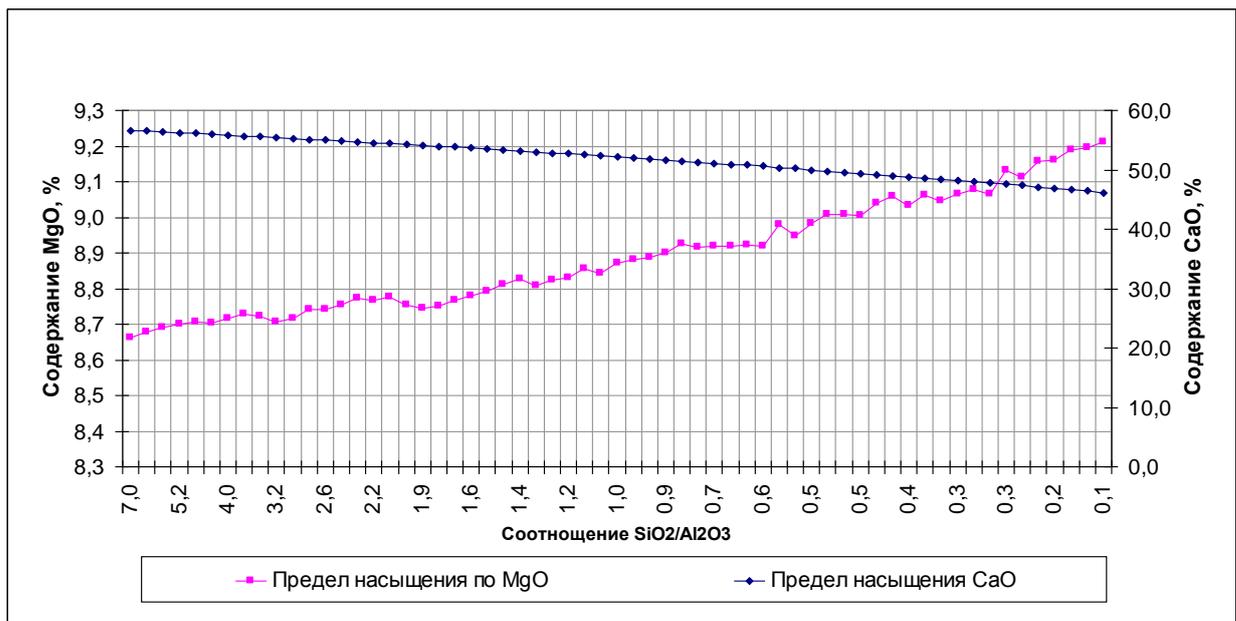


Рисунок 3.20 – Предел насыщения гомогенной составляющей шлака MgO в зависимости от предела насыщенности CaO

Таблица 3.14 – Расчетные пределы насыщения гомогенной составляющей шлага MgO и CaO в зависимости от содержания SiO₂ и Al₂O₃

| | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Содержание MgO | 8,66 | 8,68 | 8,69 | 8,70 | 8,71 | 8,70 | 8,72 | 8,73 | 8,72 | 8,71 |
| Содержание CaO | 56,7 | 56,5 | 56,4 | 56,2 | 56,1 | 56,0 | 55,8 | 55,7 | 55,6 | 55,4 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 7,00 | 6,27 | 5,67 | 5,15 | 4,71 | 4,33 | 4,00 | 3,71 | 3,44 | 3,21 |
| Содержание MgO | 8,72 | 8,74 | 8,74 | 8,76 | 8,77 | 8,77 | 8,78 | 8,75 | 8,74 | 8,75 |
| Содержание CaO | 55,3 | 55,1 | 55,0 | 54,8 | 54,7 | 54,5 | 54,4 | 54,3 | 54,1 | 54,0 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 3,00 | 2,81 | 2,64 | 2,48 | 2,33 | 2,20 | 2,08 | 1,96 | 1,86 | 1,76 |
| Содержание MgO | 8,77 | 8,78 | 8,79 | 8,81 | 8,83 | 8,81 | 8,82 | 8,83 | 8,86 | 8,84 |
| Содержание CaO | 53,8 | 53,7 | 53,5 | 53,3 | 53,2 | 53,0 | 52,8 | 52,7 | 52,5 | 52,4 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 1,67 | 1,58 | 1,50 | 1,42 | 1,35 | 1,29 | 1,22 | 1,16 | 1,11 | 1,05 |
| Содержание MgO | 8,87 | 8,88 | 8,89 | 8,90 | 8,93 | 8,92 | 8,92 | 8,92 | 8,92 | 8,92 |
| Содержание CaO | 52,2 | 52,0 | 51,8 | 51,6 | 51,5 | 51,3 | 51,1 | 50,9 | 50,8 | 50,6 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,86 | 0,82 | 0,78 | 0,74 | 0,70 | 0,67 | 0,63 |
| Содержание MgO | 8,98 | 8,95 | 8,98 | 9,01 | 9,01 | 9,00 | 9,04 | 9,06 | 9,03 | 9,06 |
| Содержание CaO | 50,4 | 50,2 | 50,0 | 49,8 | 49,6 | 49,4 | 49,2 | 49,0 | 48,8 | 48,6 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 0,60 | 0,57 | 0,54 | 0,51 | 0,48 | 0,45 | 0,43 | 0,40 | 0,38 | 0,36 |
| Содержание MgO | 9,05 | 9,07 | 9,08 | 9,07 | 9,13 | 9,11 | 9,16 | 9,16 | 9,19 | 9,20 |
| Содержание CaO | 48,4 | 48,2 | 48,0 | 47,8 | 47,5 | 47,4 | 47,1 | 46,9 | 46,6 | 46,4 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 0,33 | 0,31 | 0,29 | 0,27 | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,18 | 0,16 |

3.6.6.2 Влияние содержания Al₂O₃ в гомогенной составляющей шлага на степень насыщения по MgO

Для успешного проведения рафинирующих процессов необходимо высокое содержание CaO в шлаке [1]. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние предела насыщения гомогенной составляющей шлага по MgO в зависимости от различного содержания CaO. Полученные результаты представлены на рисунке 3.21. На рисунке 3.21 представлены границы насыщения шлага по MgO в зависимости от содержания в шлаке оксидов в следующих пределах: CaO от 40 до 55%, SiO₂ от 14 до 32 % и Al₂O₃ от 4 до 27%.

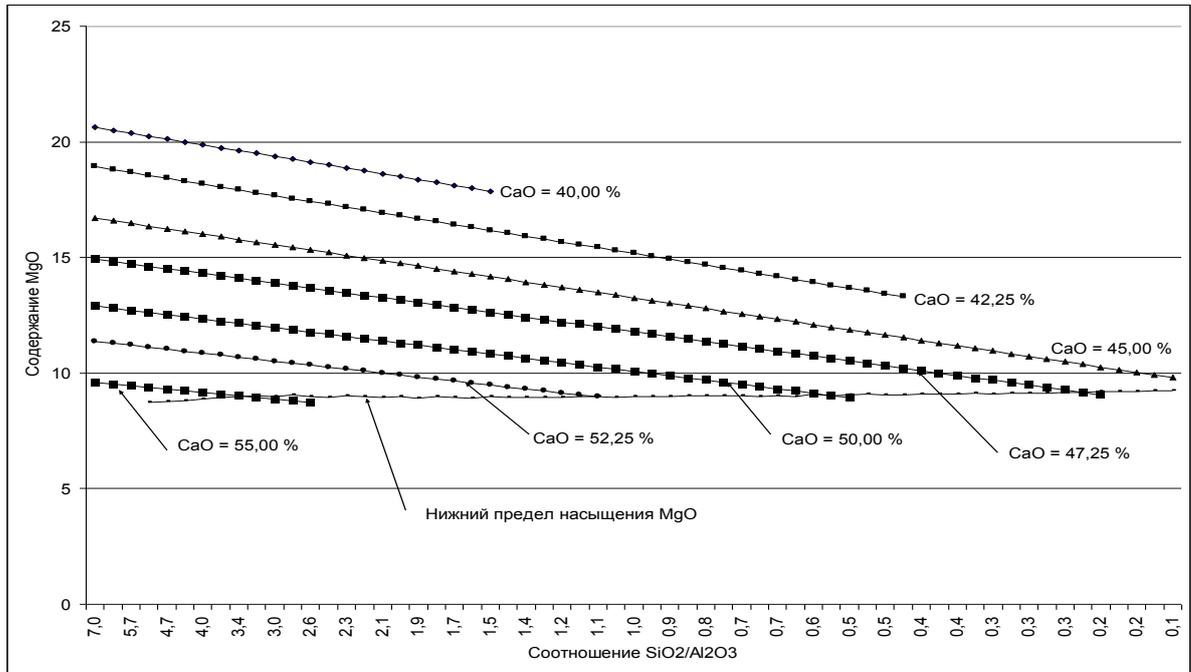


Рисунок 3.21 – Предел насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO в зависимости от содержания оксидов CaO, SiO₂ и Al₂O₃

Из данных, представленных на рисунке 3.22 видно, что при уменьшении соотношения содержания оксидов SiO₂/Al₂O₃ в гомогенной составляющей шлака, степень насыщения шлака по MgO снижается и, как следствие, снижается агрессивность шлака к футеровке металлургических агрегатов. Поэтому для повышения стойкости футеровки металлургических агрегатов на участке КОС необходимо стремиться к увеличению содержания в шлаке Al₂O₃ и уменьшению SiO₂.

При уменьшении предела насыщения шлака по MgO повышается предел насыщения по CaO. Количество CaO в гомогенной составляющей шлака увеличивается, что благоприятно сказывается на рафинирующей способности шлака.

Уменьшение предела насыщения шлака по MgO положительно скажется на стойкости футеровки металлургических агрегатов. Количество MgO переходящего из футеровки в шлак при ее разрушении зависит от предела насыщения шлака по MgO. При низком пределе насыщения шлака по MgO количество оксида магния переходящего из футеровки в шлак будет минимальным, и, как следствие, износ огнеупорных изделий будет небольшим. При высоком пределе насыщения для его достижения потребуется большое количество MgO, что приведет к повышенному износу футеровки металлургических агрегатов на АКП.

Исходя из вышеизложенного, можно сказать, что повышение содержания Al_2O_3 в гомогенной составляющей шлака положительно влияет не только на рафинирующих процессах, но и на стойкости футеровки металлургических агрегатов.

Для повышения стойкости футеровки необходимо повышать количество плавок, обрабатываемых шлаком, насыщенным по MgO . Поэтому необходимо моделировать такие составы шлаков, которые обеспечат насыщение по MgO без снижения рафинирующих свойств.

Рассмотрели степень насыщения шлака по MgO при основности (CaO/SiO_2) более 2, т.к. по мнению авторов [1], именно при такой основности наступают благоприятные условия для проведения рафинировочных процессов. Полученная область насыщения представлена на рисунке 3.22 и выделена более темным цветом.

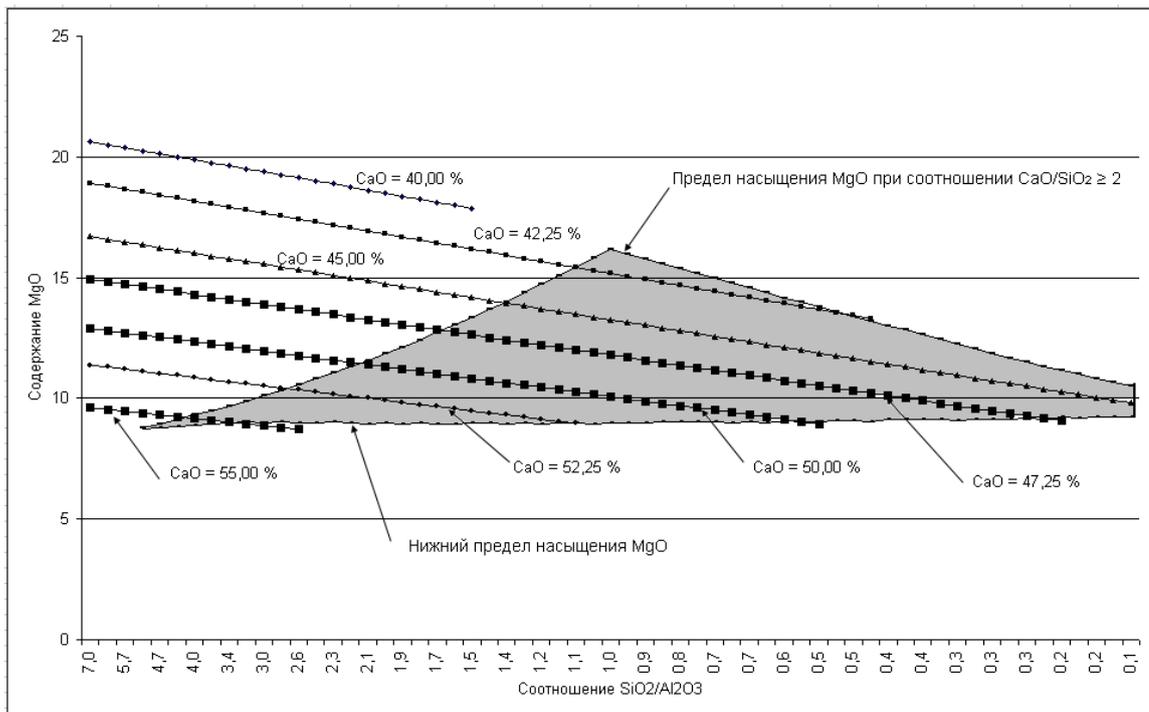


Рисунок 3.22 – Предел насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO при основности шлака (CaO/SiO_2) более 2

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.22, область насыщения шлака по MgO может находиться при содержании в шлаке CaO ниже 42,25%. Такое низкое содержание CaO не обеспечит достаточное количество анионов кислорода для проведения рафинирующих процессов. Из работы [1] содержание CaO должно быть более 50%.

На этом основании рассчитали состав шлака для основности (CaO/SiO_2) более 2, и при этом учитывали, что содержание CaO в гомогенной фазе должно быть более 50%.

Полученные результаты представлены на рисунке 3.23 и в таблицах 3.15 – 3.17. На рисунке 3.23 шлак с рациональными значениями содержания оксидов CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и MgO показан более темной областью.

Для проведения рафинирующих процессов, на АКП наводят жидкоподвижный высокоосновный шлак. На рисунке 3.23 темной областью выделено рациональное содержание оксидов CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и MgO в гомогенной фазе. По этим данным можно определить их оптимальное количество. При наведении шлака необходимо стремиться попасть в данную область, т.к. это благоприятно отразится на рафинирующей способности шлака и снизит его агрессивное воздействие на футеровку.

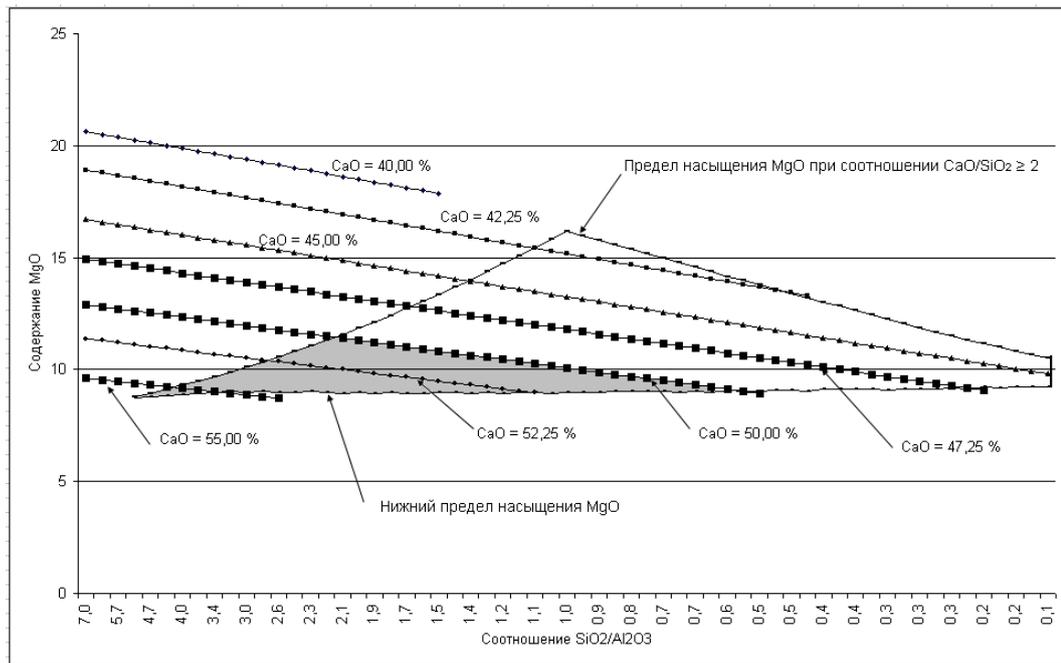


Рисунок 3.23 – Значения содержания оксидов CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и MgO в гомогенной фазе сталеплавильного шлака
Математически область, с рациональными значениями содержания оксидов CaO , Al_2O_3 , SiO_2 и MgO , описывается следующими неравенствами:

$$y_1 \leq 0,22 \cdot x + 8,44, \quad (3.29)$$

$$y_2 \leq -0,094 \cdot x + 12,997, \quad (3.30)$$

$$y_3 \geq 0,0086 \cdot x + 8,623, \quad (3.31)$$

где, x – это отношение концентраций $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в гомогенной составляющей шлака.

Таблица 3.15 – Расчетные значения содержания оксидов MgO , SiO_2 и Al_2O_3 в гомогенной фазе шлака при заданном CaO ($\text{CaO} = 55,00\%$), %

| Оксид | Массовая доля, % | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| CaO | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| MgO | 9,61 | 9,53 | 9,5 | 9,39 | 9,31 | 9,24 | 9,16 | 9,09 | 9,02 | 8,94 | 8,87 | 8,79 | 8,72 |
| Al ₂ O ₃ | 4,42 | 4,88 | 5,33 | 5,79 | 6,25 | 6,71 | 7,17 | 7,63 | 8,10 | 8,56 | 9,03 | 9,50 | 9,98 |
| SiO ₂ | 30,97 | 30,59 | 30,21 | 29,83 | 29,44 | 29,06 | 28,67 | 28,28 | 27,89 | 27,49 | 27,10 | 26,70 | 26,30 |

Таблица 3.16 – Расчетные значения содержания оксидов MgO , SiO_2 и Al_2O_3 в гомогенной фазе шлака при заданном CaO ($\text{CaO} = 50,00\%$), %

| Оксид | Массовая доля, % | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| CaO | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| MgO | 12,90 | 12,62 | 12,34 | 12,05 | 11,77 | 11,49 | 10,54 | 10,26 | 9,98 | 9,70 | 9,41 | 9,13 | 8,94 |
| Al ₂ O ₃ | 4,64 | 6,07 | 7,53 | 9,01 | 10,51 | 12,04 | 17,26 | 18,88 | 20,51 | 22,17 | 23,85 | 25,54 | 26,69 |
| SiO ₂ | 32,46 | 31,31 | 30,13 | 28,93 | 27,72 | 26,48 | 22,19 | 20,86 | 19,51 | 18,14 | 16,74 | 15,33 | 14,37 |

Таблица 3.17 – Расчетные значения содержания оксидов MgO , SiO_2 и Al_2O_3 в гомогенной фазе шлака при заданном CaO ($\text{CaO} = 52,25\%$), %

| Оксид | Массовая доля, % | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 |
| CaO | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 | 52,25 |
| MgO | 11,38 | 11,2 | 11,03 | 10,69 | 10,51 | 10,17 | 10,00 | 9,83 | 9,65 | 9,40 | 9,14 | 8,97 | |
| Al ₂ O ₃ | 4,55 | 5,48 | 6,43 | 8,34 | 9,31 | 11,27 | 12,27 | 13,27 | 14,29 | 15,82 | 17,38 | 18,42 | |
| SiO ₂ | 31,83 | 31,06 | 30,29 | 28,72 | 27,93 | 26,31 | 25,48 | 24,65 | 23,81 | 22,53 | 21,24 | 20,36 | |

По известным значениям содержания в шлаке оксидов Al_2O_3 , SiO_2 и CaO с помощью неравенств (3.29) – (3.31) можно определить рациональное содержание MgO . При расчетах необходимо учитывать, что содержание CaO в гомогенной составляющей шлака не должно быть меньше 50%.

Таким образом, степень насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO находится в определенной области и имеет границы, которые зависят от содержания CaO , SiO_2 и Al_2O_3 . Верхний предел насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO не зависит от содержания в нем CaO . Данный параметр зависит от содержания SiO_2 и Al_2O_3 . Нижний предел насыщения гомогенной состав-

ляющей по MgO , при заданном содержании SiO_2 и Al_2O_3 , ограничен пределом растворимости в шлаке CaO . Повышение содержания Al_2O_3 в гомогенной составляющей шлака уменьшает предел насыщения MgO в шлаке, что положительно сказывается на стойкости футеровки металлургических агрегатов и рафинирующих свойствах шлака. Рассчитан состав шлака, который удовлетворяет требованиям по проведению рафинирующих процессов и менее агрессивен по отношению к футеровке.

3.7 Оценка защитных свойств гарнисажа, формируемого шлаком на рабочем слое футеровки металлургических агрегатов

Возможность образования защитного покрытия зависит от свойств, как самого гарнисажа, так и от свойств применяемых огнеупорных изделий. По мнению авторов [151], кристаллизация отложений на подложке или, как в нашем случае, поверхности огнеупора будет определяться ориентационно-размерным соотношением. Вероятность отложения новой фазы увеличивается, если оба вещества кристаллизуются в одинаковой сингонии и имеют равные или кратные параметры решетки.

Одной из составляющих огнеупорных изделий, применяемых в футеровке стальной ковша и вакуум-камеры, являются шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ и $MgO \cdot Cr_2O_3$, поэтому целесообразно рассмотреть возможность выделения из шлакового расплава шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, которая осаждается на футеровке металлургических агрегатов и способствует созданию защитного гарнисажа, препятствующего интенсивной пропитке огнеупоров.

Для подтверждения данного положения были проведены исследования по условиям образования защитного гарнисажа, его составу и свойствам.

3.7.1 Условия образования защитного гарнисажа

Расчет активности шпинелеобразования $MgO \cdot Al_2O_3$ для различных составов шлаков выполнили с помощью теории совершенных ионных растворов.

Для расчетов были выбраны шлаки с различным содержанием оксидов, состав которых представлен в таблице 3.18. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.24.

Таблица 3.18 – Состав шлаков с различным содержанием оксидов

| № шлака | Массовая доля, % | | | |
|---------|------------------|------------------|--------------------------------|-----|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO |
| 1 | 66,5 | 16,5 | 9,9 | 6,0 |
| 2 | 62,1 | 15,9 | 13,6 | 6,5 |
| 3 | 60,4 | 15,6 | 15,4 | 6,8 |
| 4 | 58,7 | 15,4 | 17,0 | 7,1 |
| 5 | 57,2 | 15,2 | 18,6 | 7,3 |

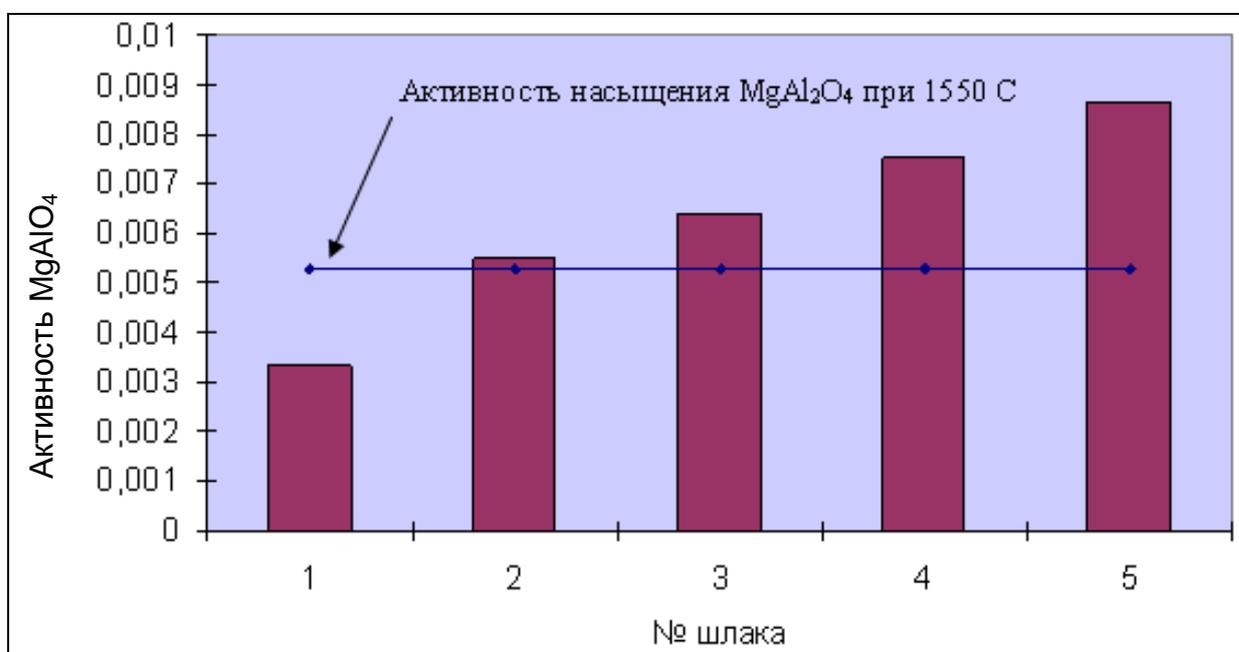


Рисунок 3.24 – Активность насыщения по MgAl₂O₄ при различных составах шлака

Из данных, представленных на рисунке 3.24 видно, что выделение шпинели в защитном гарнисаже происходит только при повышенном содержании оксида алюминия и оксида магния. Поэтому, для образования защитного гарнисажа, содержащего шпинель, необходимо иметь в шлаке повышенное содержание Al₂O₃ и MgO.

3.7.2 Состав и свойства защитного гарнисажа

Для определения состава защитного гарнисажа было отобрано огнеупорное изделие стальной ковша. Место отбора представлено на рисунке 3.25. Также, был ото-

бран шлак с последней плавки, перед постановкой сталеразливочного ковша на холодный ремонт состав которого следующий (основные компоненты), %: CaO – 53,9; SiO₂ – 21,4; Al₂O₃ – 15,6; MgO – 6,4.

Далее был проведён рентгеноструктурный анализ в области перехода шлак – огнеупорное изделие методом послойного снятия с поверхности огнеупора, на которой происходило взаимодействие шлака и самого огнеупора. Съёмка проводилась с поверхности полировок, поэтому наблюдалось как неравномерное распределение фазообразующих продуктов, так и уширение или (и) ослабление их интенсивностей за счет того, что пробы представлены не в виде порошка.



Рисунок 3.25 – Место отбора алюмопериклазоуглеродистого огнеупорного изделия

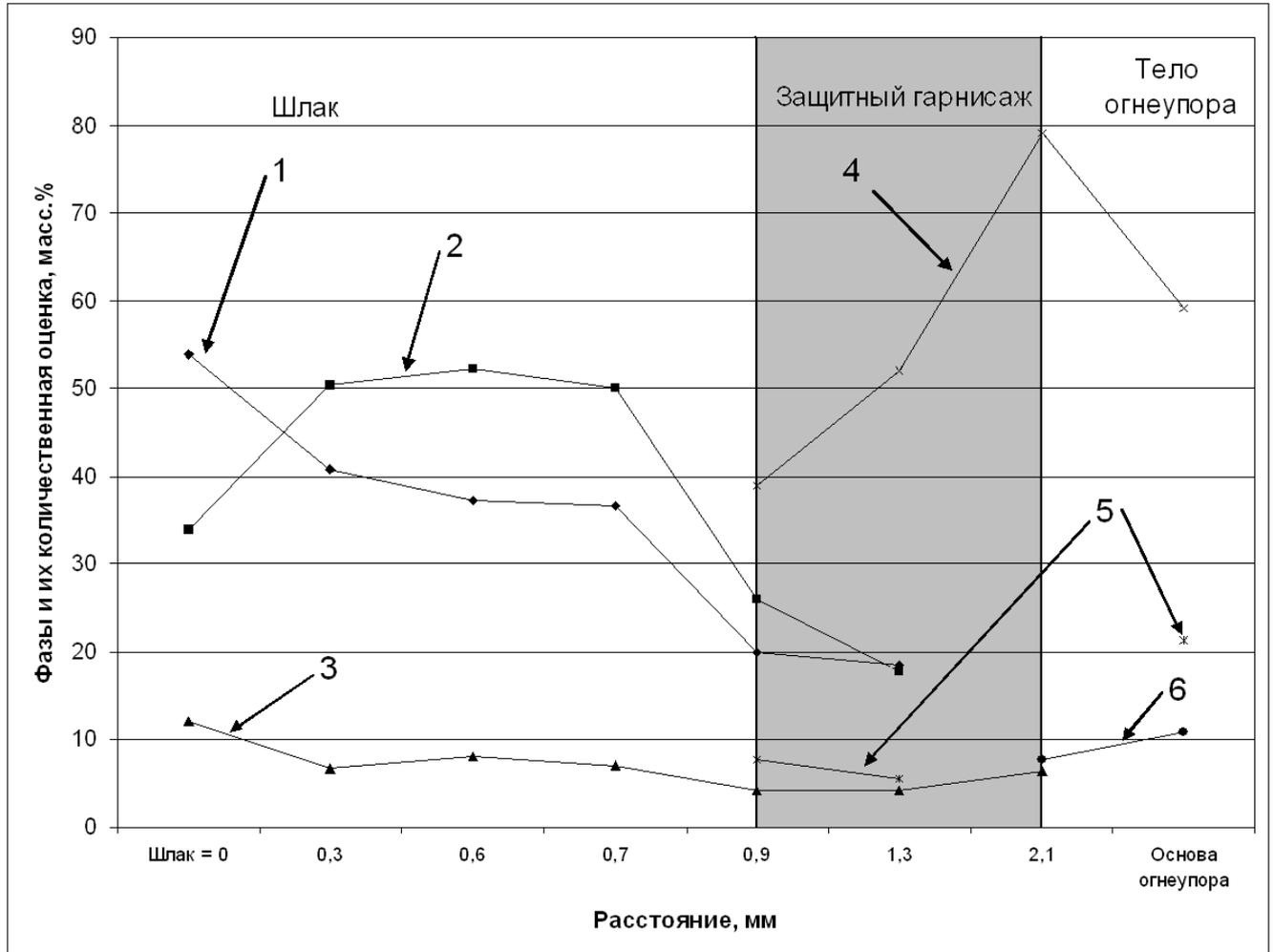
Сначала проведена съёмка с неровной поверхности той части огнеупора, где происходит взаимодействие шлака с огнеупором. Результаты рентгенофазового анализа показали присутствие следующих фаз: $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; MgO . Структура $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ проявляется на поверхности огнеупора недостаточно сформированной.

Для исследования был представлен огнеупор высотой $h = 40\text{-}45$ мм (рис. 3.26)



Рисунок 3.26 – Вид образца алюмопериклазуюгродистого огнеупорного изделия

В дальнейшем, проводили послойное снятие поверхности огнеупора, прилегающего к шлаку, и рентгенографическую съёмку. Результаты съёмки и расшифровки, а также количественная оценка присутствующих фаз представлены в таблице 3.19 и на рисунке 3.27.



1 – $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; 2 – $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$; 3 – MgO ; 4 – MgAl_2O_4 ; 5 – Al_2O_3 ;
6 – C (графит); более темным участком представлен защитный гарнисаж

Рисунок 3.27 – Изменение фазового состава огнеупорной футеровки и шлака при удалении от рабочей поверхности огнеупора

Из полученных данных, можно сделать вывод, о том, что с повышением содержания Al_2O_3 увеличивается возможность образования тугоплавкой шпинели в защитном слое гарнисажа. Толщина образования фаз, содержащих шпинель, может достигать более 1 мм. Причем содержание шпинели в гарнисаже больше, чем слое огнеупора. Различается содержание глинозема и углерода и т.д., т.е. шпинель выделялась в гарнисаж из шлака. Следовательно, гарнисаж шлакового происхождения.

Таблица 3.19 – Фазы, обнаруженные рентгенографическим методом и их количественная оценка

| Толщина снятого слоя с огнеупора со стороны шлака | Фазы, обнаруженные рентгенографическим методом и их количественная оценка (масс.%) | | | | | | | |
|--|--|---|-------|---------------------------|-------------------------|------------|-----------------------|---------------------|
| | $5\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ | MgO | MgAl_2O_4 | Al_2O_3 | С (графит) | Mg-Fe-Al-O-Si-Al-O-OH | Дополнительная фаза |
| 1. Исходная поверхность – верхний слой (h = 26,7-26,8мм) | 53,98 | 33,88 | 12,14 | | | | | |
| 2. 0,4-0,3 мм (h = 26,2-26,4мм) | 40,87 | 50,35 | 6,72 | | | | | 2,06 |
| 3. 0,6мм (h = 26,0мм) | 37,34 | 52,29 | 7,99 | | | | | 2,38 |
| 4. 0,7мм (h = 25,9мм) | 36,65 | 50,08 | 7,04 | | | | | 6,23 |
| 5. 0,9мм (h = 25,7мм) | 20,04 | 26,11 | 4,23 | 39,01 | 7,70 | | | |
| 6. 1,3мм (h = 25,3мм) | 18,48 | 17,75 | 4,21 | 52,12 | 5,60 | | | 1,84 |
| 7. 2,1мм (24,5мм) | | | 6,40 | 79,07 | | 7,79 | | 6,74 |
| 8. Основа огнеупора | | | | 59,08 | 21,25 | 10,89 | 4,90 | 3,88 |

3.7.3 Исследование температуры шлака в различных зонах сталковша на АКП

При расчетах активностей компонентов шлака, которые зависят от температуры принимается, что для шлака она равна температуре металла. Хотя на практике они отличаются.

Необходимо принять во внимание, что температура шлака, находящегося вблизи футеровки металлургического агрегата, вероятно, будет отличаться от средней температуры шлака.

Для решения поставленных задач по исследованию теплового режима ведения плавки на АКП были проведены замеры температур металла и шлака под электродами и возле борта сталеразливочного ковша. Результаты замеров шлака и металла представлены в таблице 3.20.

Из проведенных замеров видно, после окончания нагрева плавки на АКП температура шлака превышает температуру металла более чем на 55 °С. Далее, в течение трех минут после нагрева металла, температура металла и шлака уравниваются. Температурный режим на разных марках сталей представлен на рисунках 3.28-3.30.

Температура шлака возле футеровки сталковша меньше на 10°С в независимости от периода нагрева металла.

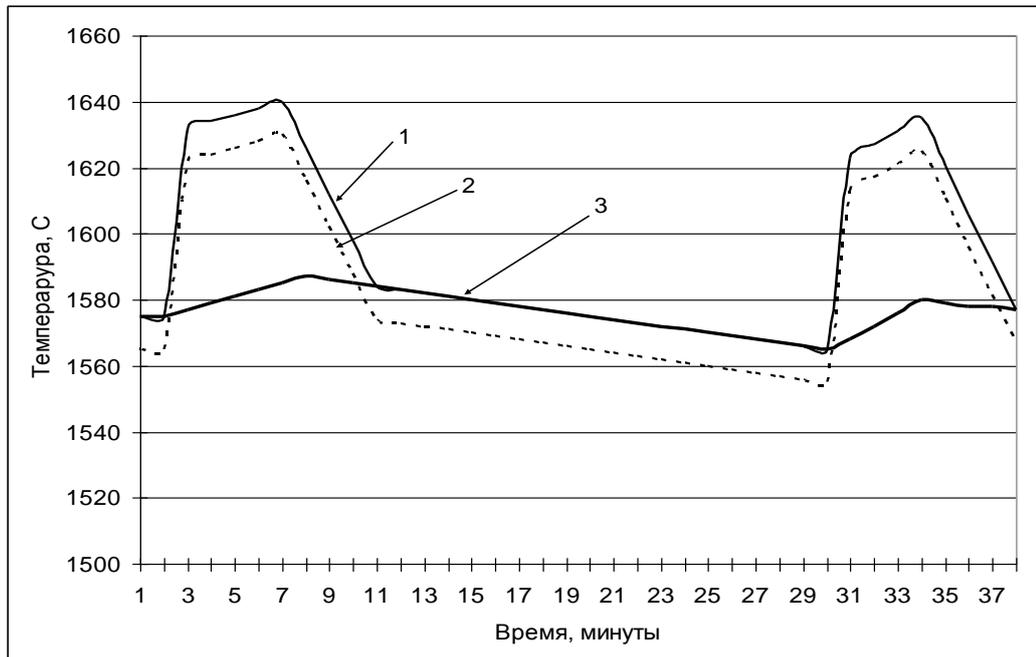
При выборе рациональных добавок, необходимо учитывать, что в период нагрева металла температура шлака может превышать температуру металла более чем на 55°С.

Для снижения агрессивности шлака к футеровке, необходимо иметь насыщенные шлаки по MgO.

Основное время обработки металла на АКП составляет проведение рафинировочных процессов. Период повышенных температур (нагрев металла) составляет для различных марок сталей от 24 до 44%, поэтому рационально проводить расчеты по насыщению шлаков MgO до 1600°С.

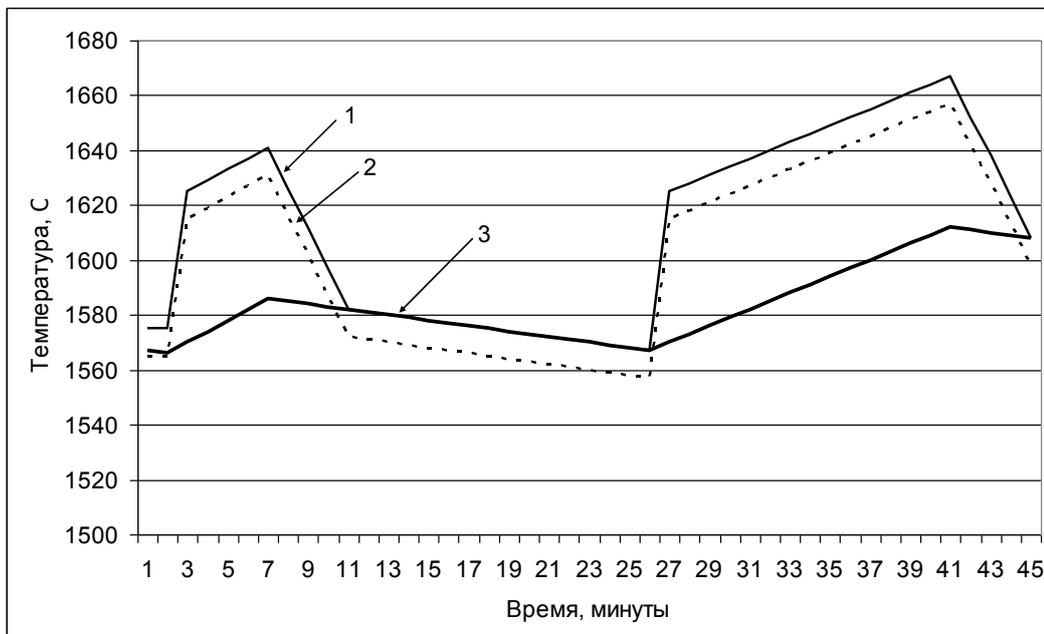
В период нагрева металла температура шлака повышается и уровень насыщения по MgO увеличивается. Для достижения нового уровня насыщения по MgO

можно добавлять магнийсодержащие материалы или снижать уровень насыщения.



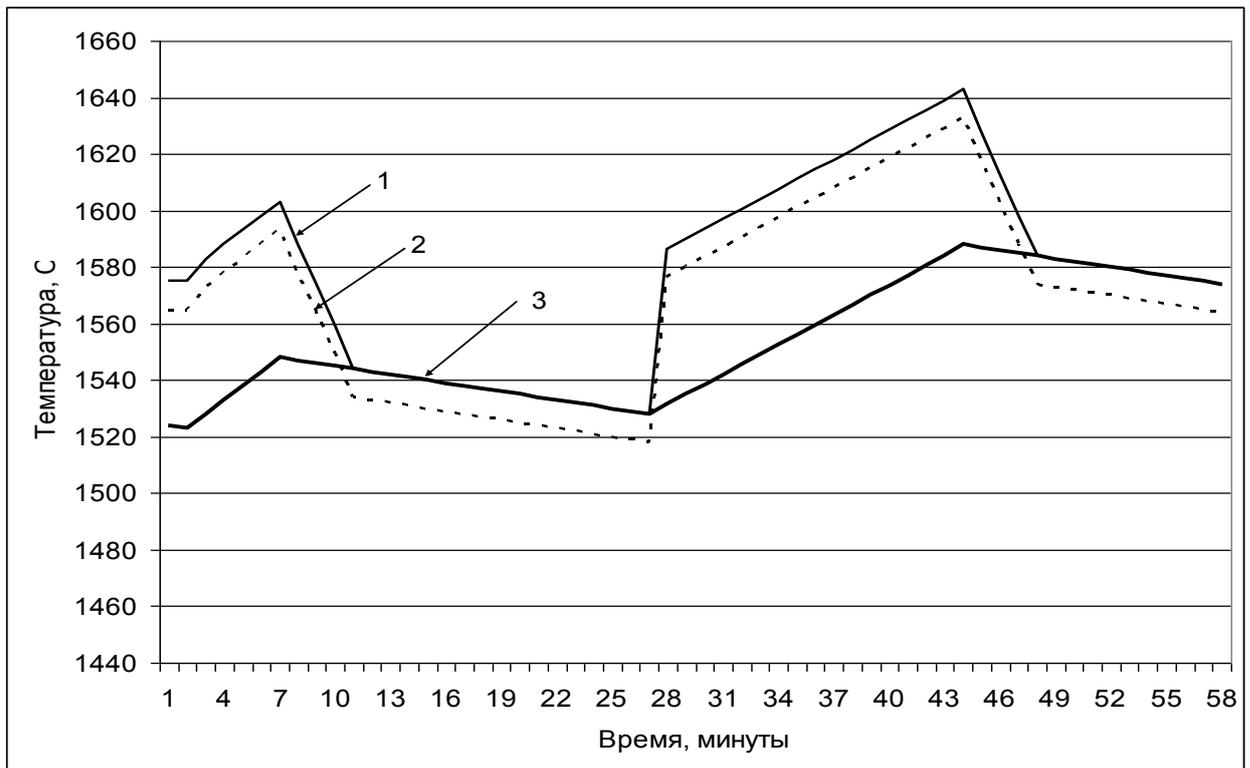
1 – температура шлака; 2 – температура шлака возле футеровки;
3 – температура металла

Рисунок 3.28 – График температурного режима металла и шлака при обработке на АКП среднеуглеродистых марок сталей, не подвергающихся обработке на циркуляционном вакууматоре



1 – температура шлака; 2 – температура шлака возле футеровки;
3 – температура металла

Рисунок 3.29 – График температурного режима металла и шлака при обработке на АКП среднеуглеродистых марок сталей, подвергающихся обработке на циркуляционном вакууматоре



1 – температура шлака; 2 – температура шлака возле футеровки;
3 – температура металла

Рисунок 3.30 – График температурного режима металла и шлака при обработке высокоуглеродистых марок сталей, подвергающихся обработке на циркуляционном вакууматоре

Первый путь не рационален, т.к. после окончания нагрева температура шлака снижается и выравнивается с температурой металла. Введенный MgO выделится в виде твердой фазы, что приведет к повышенной гетерогенизации шлака.

Второй путь – это снижение предела насыщения шлака по MgO, как было показано в разделе 3.6.6, что достигается путем повышения содержания в шлаке Al_2O_3 . Данный путь более целесообразен, т.к. глиноземсодержащий материал может применяться и в качестве разжижителя шлака, взамен обожженной кремнеземсодержащей добавки (ОКД). Фактически, это единственный способ снижения агрессивности шлака в период его значительного перегрева.

Таблица 3.20 – Замеры температур металла и шлака в различные периоды обработки металла на АКП

| № п/п | № плавки | Марка стали | Температура металла, °С | Температура шлака, °С | Примечание |
|-------|----------|-------------|-------------------------|-----------------------|--|
| 1 | 327712 | К76Ф | 1552 | 1590 | После нагрева плавки |
| 2 | 318344 | Ст3сп | 1572 | 1547 | После добавки шлакообразующих материалов |
| | | | 1576 | 1575 | Перед выкатом сталеразливочного ковша |
| 3 | 327714 | 09Г2С | 1573 | 1584 | Перед выкатом сталеразливочного ковша |
| 4 | 318346 | 40Х | 1532 | 1539 | В середине обработки |
| | | | 1586 | 1573 | Перед выкатом сталеразливочного ковша |
| 5 | 337259 | К76Ф | 1596 | 1613 | В середине обработки |
| 6 | 327715 | 09Г2С | 1589 | 1566 | После добавки шлакообразующих материалов |
| | | | 1580 | 1569 | Перед выкатом сталеразливочного ковша |
| 7 | 337260 | К76Ф | 1580 | 1583 | В середине обработки |
| 8 | 327716 | 09Г2С | 1582 | 1603 | После нагрева плавки |
| | | | 1583 | 1587 | В середине обработки |
| 9 | 337585 | 16Г2-6 | 1594 | 1600,8 | В середине обработки |
| | | | 1605 | 1674 | После нагрева плавки |
| | | | 1623,5 | 1677,5 | После нагрева плавки |
| 10 | 328023 | 16Г2-6 | 1608,6 | 1657,1 | После нагрева плавки |
| 11 | 318618 | 3сп | 1591,6 | 1664,9 | После нагрева плавки |
| 12 | 328026 | 16Г2-6 | 1605 | 1608 | В середине обработки |
| | | | | 1596,9 | Замер возле борта |
| | | | 1606 | 1680 | После нагрева плавки |
| 13 | 328027 | 16Г2-6 | 1598,3 | 1678,2 | После нагрева плавки |
| | | | | 1650 | Замер возле борта |

3.8 Выбор материалов для наведения рафинирующего шлака

С целью проведения рафинировочных процессов на АКП наводят высокоосновные, жидкоподвижные шлаки. Для придания высокой основности вводят CaO в количестве от 0,5 до 1,5 тонн на плавку в зависимости от марки стали. Для растворения CaO необходимо ввести добавки, которые снизят температуру плавления CaO, например CaF₂, ОКД (добавка кремнесодержащая) или алюмосодержащие материалы.

Плавиновый шпат широко применяется в сталеплавильном производстве, как эффективный разжижитель шлака. Однако применение плавинового шпата имеет ряд существенных недостатков:

- фторид кальция способствует разъеданию футеровки сталковшей и вакуум – камер;
- в условиях высоких температур, происходит частичное испарение CaF₂, приводящее к ухудшению экологической обстановки.

Поэтому на современных предприятиях стараются заменить применение фторида кальция другими разжижающими добавками.

Для растворения CaO в шлаке используют материалы на основе кремнезема и глинозема, которые образуют легкоплавкие эвтектики с оксидом кальция и тем самым снижают его температуру плавления. На металлургических предприятиях в качестве кремнеземсодержащей добавки используют ОКД (более 55,0% кремнезема, более 25,0% глинозема и более 5,0% оксидов кальция и магния) [152]. Однако, использование такого типа материала для проведения рафинирующих процессов не целесообразно, т.к. одним из важнейших условий достижения высокого значения коэффициента распределения серы, в период рафинирования, является снижение содержания SiO₂ в шлаке [1], поэтому необходимо разрабатывать разжижающие шлак материалы на основе Al₂O₃.

3.9 Выводы к главе 3

1. Увеличивая количество плавов, содержащих насыщенный по MgO шлак, можно снизить удельный износ огнеупорных изделий стальной ковша, и как следствие, повысить стойкость футеровки данного металлургического агрегата.

2. Для снижения агрессивного воздействия шлака на футеровку стальной ковша, необходимо увеличивать содержание в нем MgO до предела насыщенности, т.к. избыток MgO перейдет в твердую фазу, с гетерогенизацией системы, что негативно отразится на рафинирующей способности шлака.

3. Вязкость гетерогенных шлаков удовлетворительно описываются уравнениями усовершенствованной полимерной моделью. Показано, что при увеличении содержания твердой фазы в шлаке на АКП более 35% от общей массы, его вязкость превышает показатель в 0,3 Па·с,

4. Предел насыщения гомогенной составляющей шлака по MgO находится в определенной области и имеет границы, которые зависят от содержания CaO, SiO₂ и Al₂O₃. Определены границы насыщения шлака по MgO в зависимости от содержания в шлаке оксидов в следующих пределах: CaO от 40 до 55%, SiO₂ от 14 до 32 % и Al₂O₃ от 4 до 27%. Повышение содержания Al₂O₃ в гомогенной составляющей шлака уменьшает уровень насыщения шлака по MgO.

5. Выделение шпинели в защитном гарнисаже происходит при повышенном содержании оксида алюминия и магния. Поэтому, для образования защитного гарнисажа, содержащего шпинель, необходимо повышать содержание в шлаке MgO до предела насыщения и Al₂O₃ более 15 %.

6. Показано, что в различные периоды плавки на АКП, температура шлака может отличаться от температуры металла. В период нагрева металла температура шлака превышает температуру стали более 55 °С. Температура шлака на расстоянии 10-15 см от футеровки меньше на 10 °С средней температуры шлака в зависимости от периода нагрева металла.

7. Для повышения стойкости футеровки металлургических агрегатов на участке ковшовой обработки стали целесообразно использовать в качестве разжижителя шлака материал на основе Al₂O₃.

4 РАЗРАБОТКА СОСТАВА ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ В УСЛОВИЯХ КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

4.1 Оценка существующей технологии наведения шлака на АКП в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Оценили шлаки, наводимые в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК» с позиций рафинировочных процессов и снижения агрессивности к футеровке металлургических агрегатов.

Для оценки были отобраны реальные металлургические шлаки от более чем 6000 плавок различных марок сталей с расчетными значениями, содержащихся в них оксидов. Средние значения содержания оксидов в шлаках представлены в таблице 4.1. Химический состав марок сталей представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.1 - Усредненный химический состав шлаков наводимых на АКП в конвертерном цехе ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

| Марка стали | Количество плавок, шт. | Средний химический состав шлаков (массовая доля оксидов), % | | | | |
|-------------|------------------------|---|------------------|-------|------|--------------------------------|
| | | CaO | SiO ₂ | MgO | FeO | Al ₂ O ₃ |
| 08Ю | 130 | 53,03 | 20,83 | 9,08 | 2,44 | 9,83 |
| 09Г2С | 160 | 54,12 | 22,47 | 10,33 | 1,04 | 10,73 |
| 20тр | 700 | 55,52 | 21,06 | 10,41 | 1,19 | 10,67 |
| Зсп | 650 | 55,94 | 21,16 | 10,23 | 1,28 | 9,52 |
| Дтр | 225 | 55,30 | 20,59 | 10,21 | 1,25 | 10,63 |
| К76Ф | 2470 | 57,70 | 21,35 | 8,95 | 1,11 | 8,91 |
| КОЛ | 2150 | 57,67 | 21,04 | 9,14 | 1,09 | 9,04 |

Массив данных (табл. 4.1) по маркам сталей разделили на две группы:

- первая группа – это низко и среднеуглеродистые марки стали;
- вторая группа – это высокоуглеродистый металл транспортного назначения.

Таблица 4.2 – Химический состав марок сталей выплавляемых на АКП

| Марка стали | Химический состав (массовая доля элементов), % | | | | | | | | | | |
|-------------|--|---------------------|---------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|--------|
| | C | Mn | Si | Al | P | S | Cr | Ni | Cu | V | N |
| 08Ю | <u>0,000</u> 0,070 | <u>0,20</u> 0,35 | <u>0,00</u> 0,03 | <u>0,025</u> 0,070 | ≤0,020 | ≤0,025 | | | | | |
| 09Г2С | <u>0,09</u> 0,12 | <u>1,45</u> 1,70 | <u>0,50</u> 0,80 | - | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,030 | ≤0,030 | ≤0,030 | | ≤0,008 |
| 20тр | <u>0,170</u> 0,240 | <u>0,35</u> 0,65 | <u>0,25</u> 0,37 | <u>0,020</u> 0,050 | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,30 | ≤0,30 | | ≤0,008 |
| 3сп | <u>0,14</u> 0,22 | <u>0,40</u> 0,65 | <u>0,15</u> 0,30 | - | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,30 | ≤0,30 | ≤0,30 | | ≤0,010 |
| Дтр | <u>0,41</u> 0,48 | <u>0,73</u> 0,90 | <u>0,17</u> 0,37 | - | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,025 | ≤0,30 | ≤0,025 | | |
| К76Ф | <u>0,74</u> 0,82 | <u>0,85</u> 1,05 | <u>0,30</u> 0,45 | ≤0,005 | ≤0,02 | ≤0,02 | - | ≤0,015 | | <u>0,03</u> 0,07 | |
| КОЛ | <u>0,59</u> 0,63 | <u>0,08</u> 0,90 | <u>0,35</u> 0,45 | | ≤0,030 | ≤0,02 | ≤0,02 | ≤0,025 | ≤0,025 | <u>0,02</u> 0,07 | |

Средний химический состав шлаков для первой и второй групп марок сталей приставлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Усредненный химический состав шлаков первой и второй групп марок сталей, наводимых на АКП

| Наименование групп марок сталей | Количество плавков, шт. | Средний химический состав шлаков (массовая доля оксидов), % | | | | |
|---|-------------------------|---|------------------|-------|------|--------------------------------|
| | | CaO | SiO ₂ | MgO | FeO | Al ₂ O ₃ |
| Первая группа, низко и среднеуглеродистые марки стали | 1800 | 55,35 | 21,14 | 10,23 | 1,30 | 10,21 |
| Вторая группа, высокоуглеродистые марки стали | 4200 | 57,69 | 21,21 | 9,04 | 1,10 | 8,97 |

Для рафинирующего шлака наиболее важный показатель – это способность поглощать вредные примеси из металла, которая определяется наличием свободных анионов кислорода, содержанием CaO и вязкостью шлака.

Агрессивность шлаков по отношению к футеровке зависит от их насыщенности по MgO, т.е. необходимо иметь шлаки с насыщенной гомогенной составляющей по MgO.

Также рассмотрели способность шлаков к выделению огнеупорной шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, в защитном гарнисаже.

Оценили существующие шлаки с позиций серопоглотительной способности, вязкости, количества гетерогенной фазы, насыщенности по MgO и образования шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ в защитном гарнисаже (данные представлены в таблице 4.4).

Серопоглотительную способность шлака рассчитали по методике, представленной в работе [153].

Таблица 4.4 – Типичные показатели шлака наводимого на АКП конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

| Характеристика по маркам стали | Коэффициент распределения серы, Ls | Вязкость шлака, Па·с | Количество гетерогенной фазы, % | Насыщение шлака по MgO | Насыщение гарнисажа по $MgO \cdot Al_2O_3$ |
|---|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| низко- и среднеуглеродистые марки стали | 125,67 | 0,069 | 6,90 | Насыщен | Не насыщен |
| высокоуглеродистые марки стали | 121,79 | 0,063 | 9,5 | Насыщен | Не насыщен |

Из данных, представленных в таблице 4.4 и по критериям, представленным в главе 3 видно, что шлаки по своему составу не удовлетворяют требованиям, как по рафинирующим показателям, так и по агрессивности к футеровкам металлургических агрегатов, по следующим причинам:

- низкий коэффициент распределения серы, что негативно отражается на рафинирующих свойствах;
- защитный гарнисаж не насыщен по $MgO \cdot Al_2O_3$, и как следствие на поверхности огнеупоров не происходит выделение шпинели, снижающей агрессивное воздействие технологических факторов на футеровку металлургических агрегатов.

Для повышения коэффициента распределения серы (Ls) необходимо уменьшить содержание SiO_2 в шлаке, т.к. данный компонент шлака является главным поглотителем анионов кислорода.

Для выделения $MgO \cdot Al_2O_3$ в гарнисаже и осаждения на поверхности огнеупорных изделий необходимо повысить содержание Al_2O_3 в шлаке.

4.2 Оценка глиноземсодержащих шлакообразующих материалов

В качестве разжижителя шлака используют кремнийсодержащую добавку (ОКД) в количестве 250-300 кг на плавку что составляет 1,6-0,2 кг/тонну стали. При использовании обожженной кремнийсодержащей добавки формируется шлак состава, представленного в таблице 4.3. Масса шлака для низко- и среднеуглеродистых марок сталей составляет 2050 кг, для высокоуглеродистых 2300 кг.

В главе 3 было показано, что шлак с хорошими рафинирующими и защитными свойствами должен иметь в своем составе повышенное содержание Al_2O_3 . Поэтому целесообразно заменить разжижающую добавку ОКД на материал, в состав которого входит оксид Al_2O_3 .

В качестве данных материалов были предложены следующие добавки:

- материал №1 – «РАНТАЛ 50 ГР» производства ООО «РАНТАЛ» (г. Санкт-Петербург);
- материал №2 – глиноземсодержащие брикеты производства ОООИ «РОИС» (г. Екатеринбург).

Химический состав материалов представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Усредненный химический состав материалов «РАНТАЛ 50 ГР» и глиноземсодержащих брикетов производства ОООИ «РОИС»

| Материал | Массовая доля, % | | | | | | | | | | |
|--------------|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|---------|------|
| | TiO ₂ | Al _{ме} | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | MgO | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | хлориды | ппп |
| Рантал 50 ГР | 1,98 | - | 72,1 | 20,0 | 0,71 | 0,70 | 2,05 | 0,52 | 0,31 | - | 2,95 |
| Брикеты | - | 3,2 | 55,7 | 6,04 | 1,91 | 12,6 | 2,74 | 4,3 | 3,7 | 8,1 | 11,9 |

Провели расчет параметров шлака при введении глиноземсодержащего материала в условиях участка КОС. При замене ОКД на новые разжижающие добавки оценивали шлаки с позиции рафинирующих свойств, нейтральности к футеровке металлургических агрегатов и возможности образования защитной шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ в гарнисаже.

Рассчитали варианты изменения состава шлака и его свойств при замене обожженной кремнеземсодержащей добавки на глиноземсодержащую добавку «РАНТАЛ 50 ГР» и/или глиноземсодержащие брикеты производства ОООИ «РОИС» в количестве 100, 150, 200 и 250, 300 кг, для различных марок стали.

Результаты представлены в таблицах 4.6-4.9 и на рисунках 4.1-4.6.

Таблица 4.6 – Свойства шлаков, наводимых на АКП для низко- и среднеуглеродистых марок стали при замене ОКД на глиноземсодержащий материал «РАНТАЛ 50 ГР»

| Характеристика шлака | Коэффициент распределения серы, Ls | Вязкость шлака, Па·с | Количество гетерогенной фазы, % | Насыщение шлака по MgO | Насыщение гарнисажа по MgO·Al ₂ O ₃ |
|----------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| Обычный шлак | 125,67 | 0,0560 | 6,90 | Насыщен | Не насыщен |
| Расход добавки, кг | | | | | |
| 100 | 134,13 | 0,0546 | 7,28 | Насыщен | Не насыщен |
| 150 | 138,53 | 0,0538 | 7,47 | Насыщен | Насыщен |
| 200 | 143,06 | 0,0530 | 7,65 | Насыщен | Насыщен |
| 250 | 147,72 | 0,0521 | 7,84 | Насыщен | Насыщен |
| 300 | 152,52 | 0,0511 | 8,03 | Насыщен | Насыщен |

Таблица 4.7 – Свойства шлаков, наводимых на АКП для высокоуглеродистых марок стали при замене ОКД на глиноземсодержащий материал «РАНТАЛ 50 ГР»

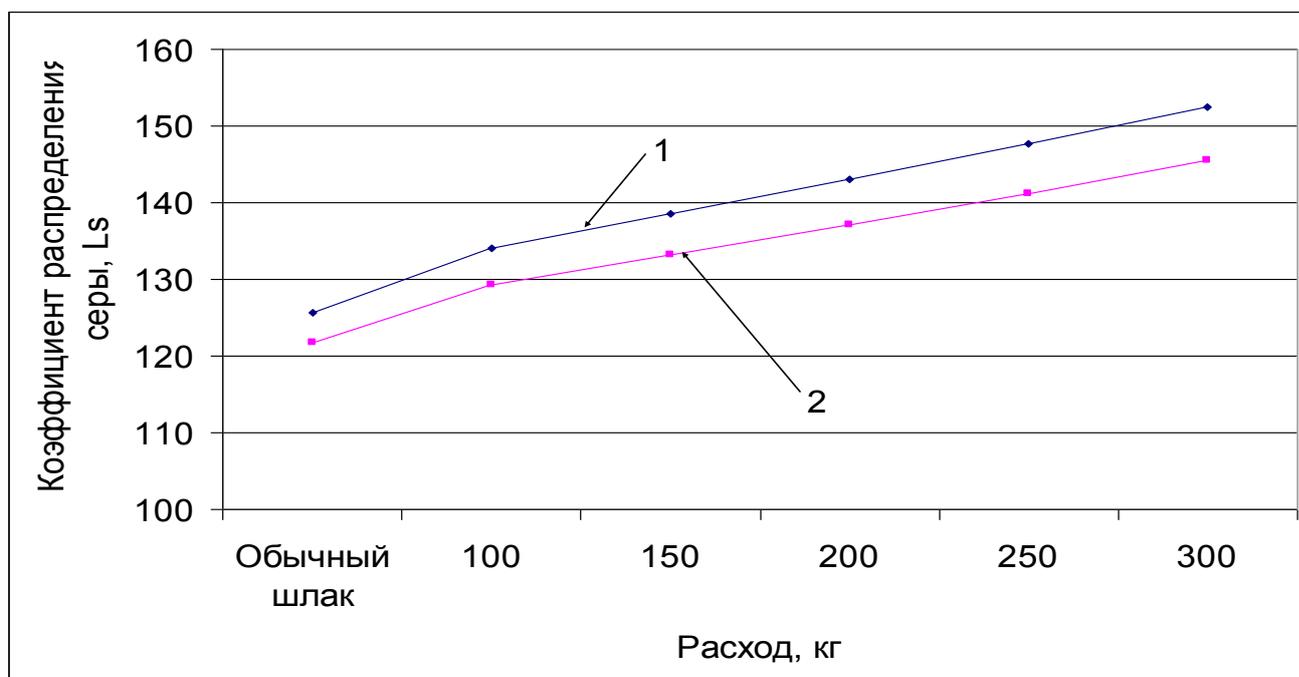
| Характеристика шлака | Коэффициент распределения серы, Ls | Вязкость шлака, Па·с | Количество гетерогенной фазы, % | Насыщение шлака по MgO | Насыщение гарнисажа по MgO·Al ₂ O ₃ |
|----------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| Обычный шлак | 121,79 | 0,0630 | 9,50 | Насыщен | Не насыщен |
| Расход добавки, кг | | | | | |
| 100 | 129,25 | 0,0617 | 9,86 | Насыщен | Не насыщен |
| 150 | 133,16 | 0,0610 | 10,04 | Насыщен | Не насыщен |
| 200 | 137,13 | 0,0601 | 10,20 | Насыщен | Не насыщен |
| 250 | 141,22 | 0,0593 | 10,38 | Насыщен | Не насыщен |
| 300 | 145,49 | 0,0583 | 10,55 | Насыщен | Не насыщен |

Таблица 4.8 – Свойства шлаков, наводимых на АКП для низко- и среднеуглеродистых марок стали при замене ОКД на материал «РОИС»

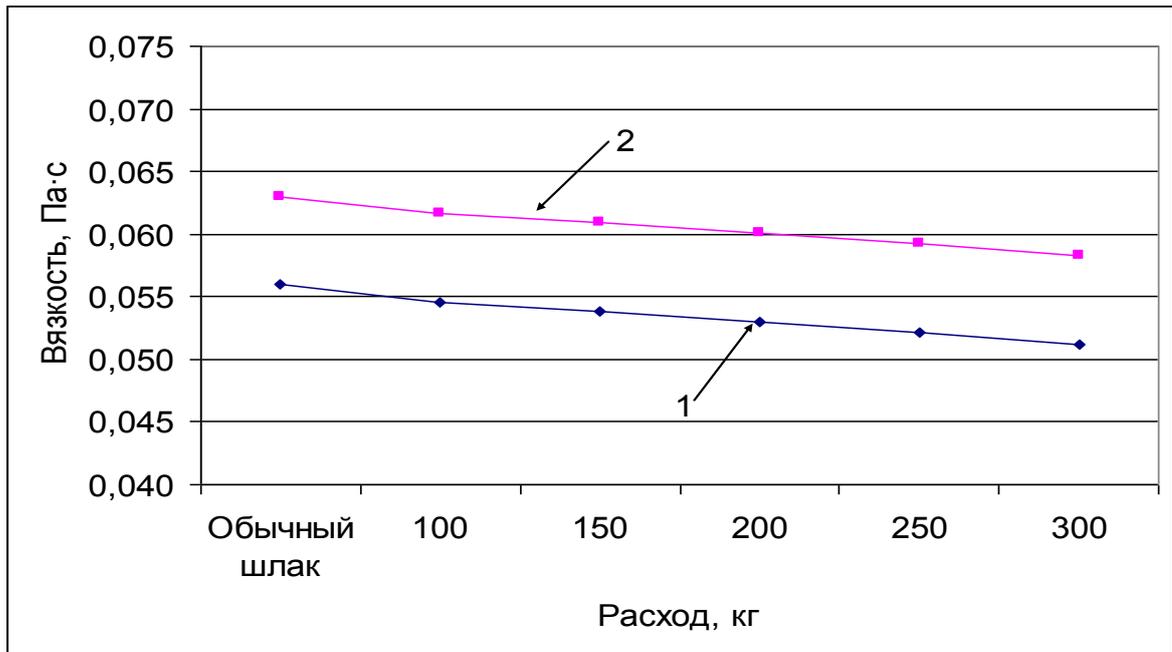
| Характеристика шлака | Коэффициент распределения серы, Ls | Вязкость шлака, Па·с | Количество гетерогенной фазы, % | Насыщение шлака по MgO | Насыщение гарнисажа по MgO·Al ₂ O ₃ |
|------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| Обычный шлак | 125,67 | 0,0560 | 6,90 | Насыщен | Не насыщен |
| Расход добавки, кг 100 | 134,02 | 0,0546 | 10,26 | Насыщен | Не насыщен |
| 150 | 138,65 | 0,0537 | 11,96 | Насыщен | Насыщен |
| 200 | 143,62 | 0,0526 | 13,65 | Насыщен | Насыщен |
| 250 | 149,02 | 0,0515 | 15,37 | Насыщен | Насыщен |
| 300 | 154,76 | 0,0503 | 17,07 | Насыщен | Насыщен |

Таблица 4.9 – Свойства шлаков, наводимых на АКП для высокоуглеродистых марок стали при замене ОКД на материал «РОИС»

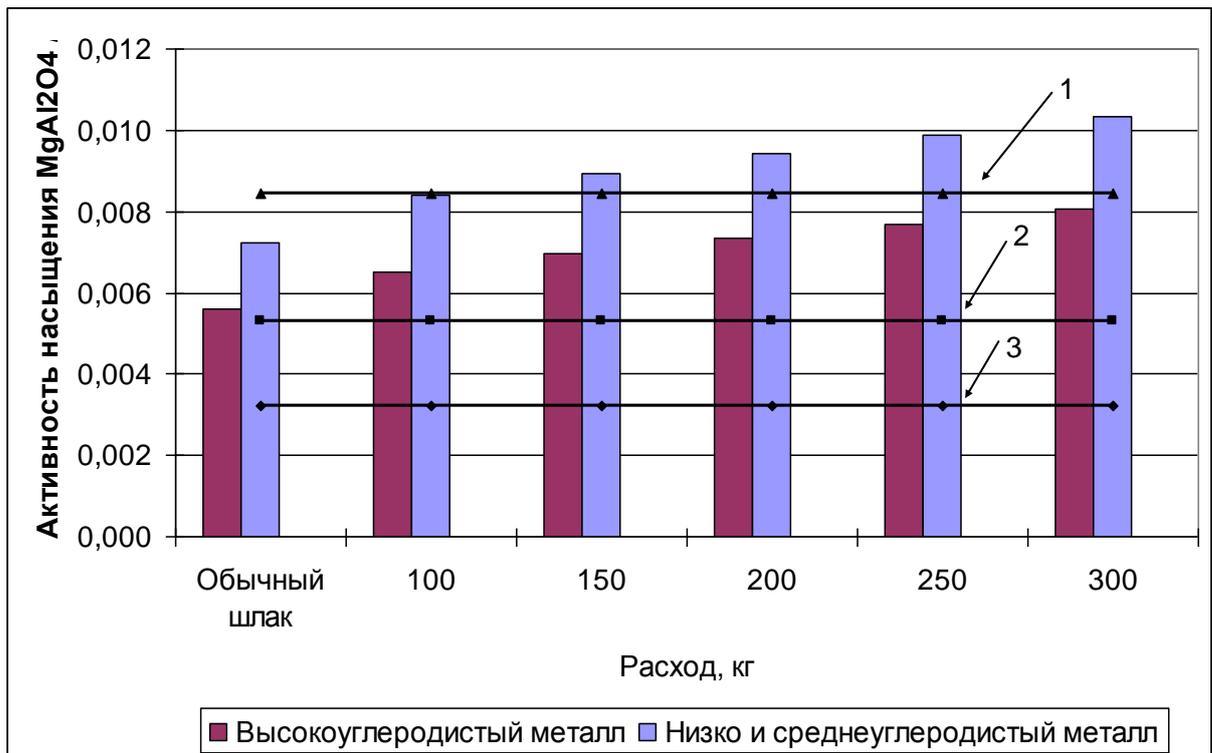
| Характеристика шлака | Коэффициент распределения серы, Ls | Вязкость шлака, Па·с | Количество гетерогенной фазы, % | Насыщение шлака по MgO | Насыщение гарнисажа по MgO·Al ₂ O ₃ |
|------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| Обычный шлак | 121,79 | 0,0630 | 9,50 | Насыщен | Не насыщен |
| Расход добавки, кг 100 | 129,26 | 0,0617 | 12,53 | Насыщен | Не насыщен |
| 150 | 133,14 | 0,0609 | 14,05 | Насыщен | Не насыщен |
| 200 | 137,34 | 0,0599 | 15,55 | Насыщен | Не насыщен |
| 250 | 141,84 | 0,0589 | 17,09 | Насыщен | Не насыщен |
| 300 | 146,62 | 0,0577 | 18,61 | Насыщен | Не насыщен |



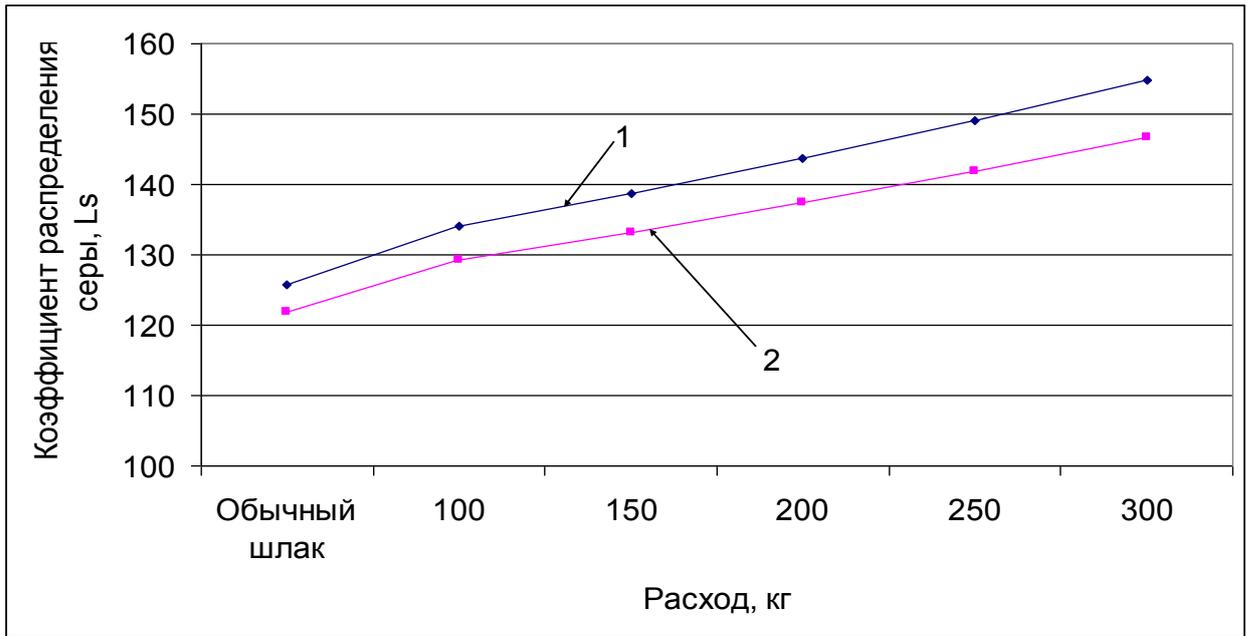
1 – низко и среднеуглеродистый металл; 2 – высокоуглеродистый металл
Рисунок 4.1 – Изменение коэффициента распределения серы при замене ОКД на материал «РАНТАЛ 50 ГР»



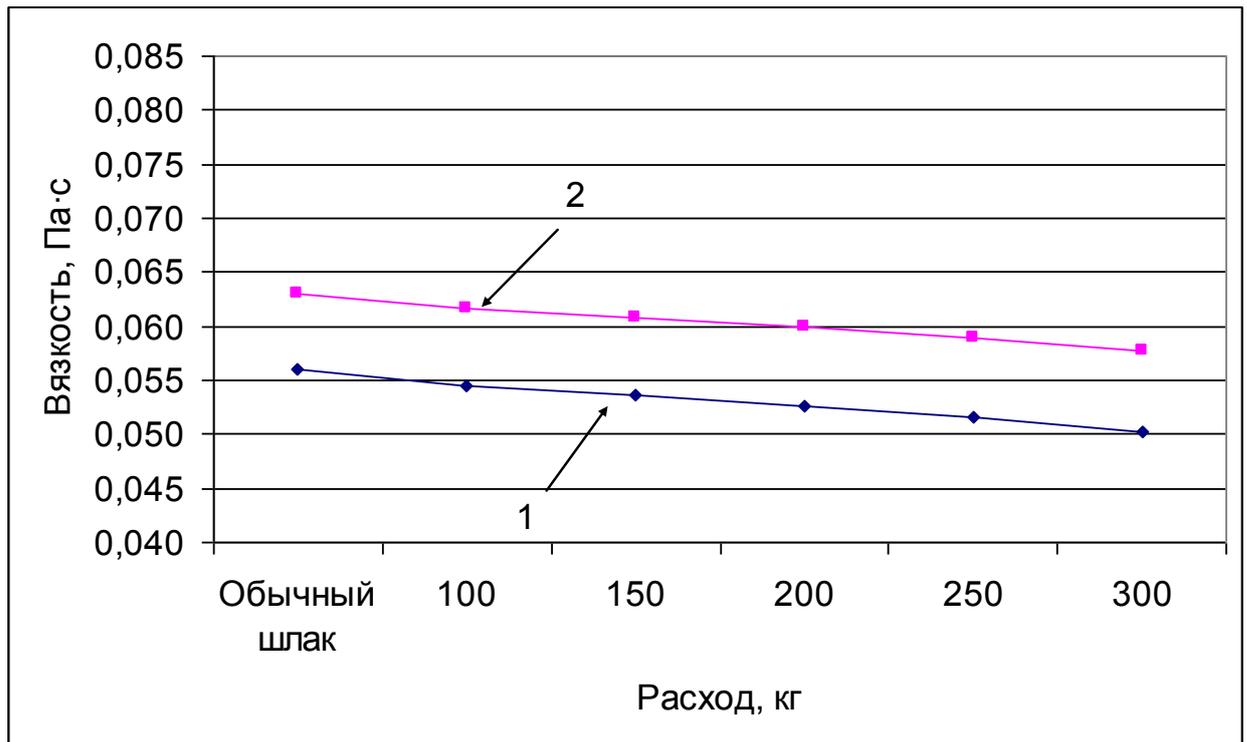
1 – низко и среднеуглеродистый металл; 2 – высокоуглеродистый металл
Рисунок 4.2 – Изменение вязкости шлаков при замене ОКД на материал «РАНТАЛ 50 ГР»



1 – активность насыщения MgAl₂O₄ при 1600 °С; 2 – активность насыщения MgAl₂O₄ при 1550 °С; активность насыщения MgAl₂O₄ при 1500 °С
Рисунок 4.3 – Изменение активности насыщения гарнисажа по MgO·Al₂O₃ при замене ОКД на материал «РАНТАЛ 50 ГР»

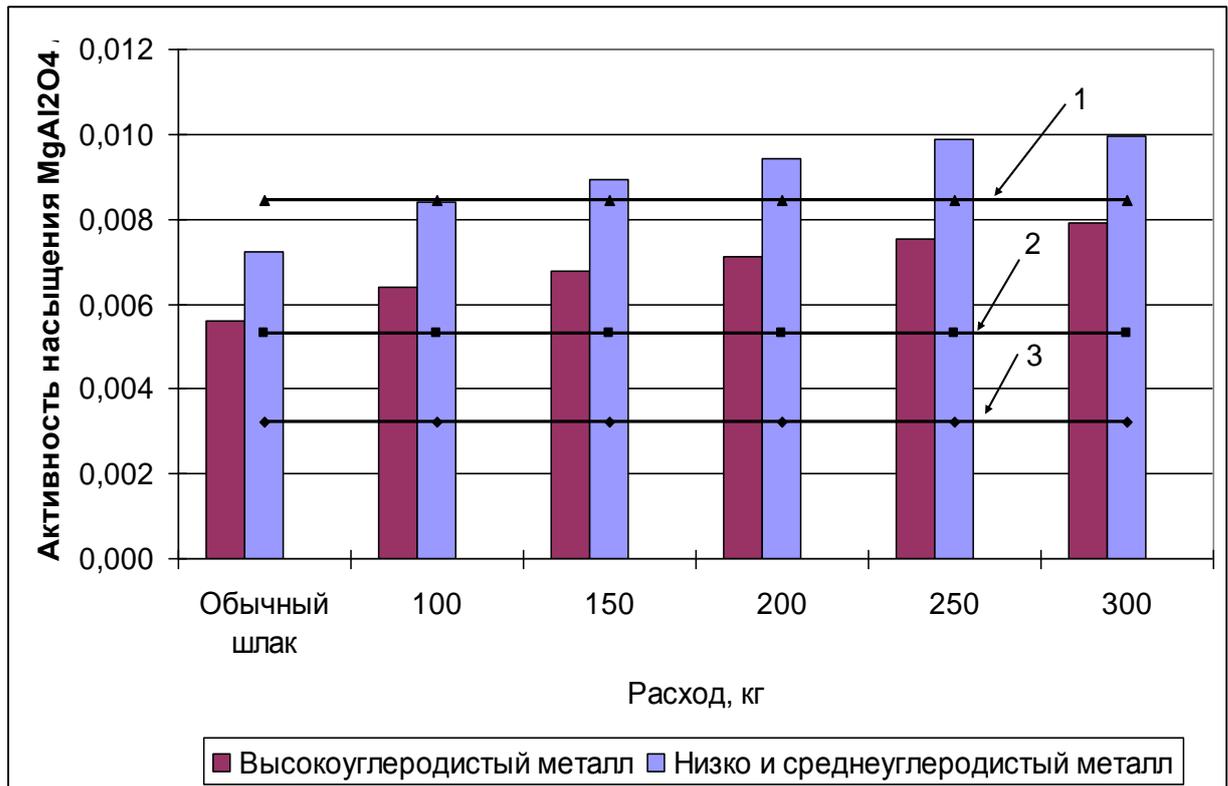


1 – низко и среднеуглеродистый металл; 2 – высокоуглеродистый металл
 Рисунок 4.4 – Изменение коэффициента распределения серы при замене ОКД на материал «РОИС»



1 – низко и среднеуглеродистый металл; 2 – высокоуглеродистый металл
 Рисунок 4.5 – Изменение вязкости шлаков при замене на материал «РОИС»

Из представленных (табл. 4.6-4.9, рис. 4.1-4.6) расчетов видно, что при полной замене разжижающей шлак добавки ОКД на «РАНТАЛ 50 ГР» и/или глиноземсодержащие брикеты «РОИС» изменяются свойства шлака:



1 – активность насыщения $MgAl_2O_4$ при 1600 °C; 2 – активность насыщения $MgAl_2O_4$ при 1550 °C; 3 - активность насыщения $MgAl_2O_4$ при 1500 °C

Рисунок 4.6 – Изменение активности насыщения гарнисажа по $MgO \cdot Al_2O_3$ при замене ОКД на материал «РОИС»

- увеличивается коэффициент распределения серы, при использовании «РАНТАЛ 50 ГР» на низко- и среднеуглеродистых марках стали коэффициент распределения серы увеличивается на 21%, на высокоуглеродистых марках сталей на 19%; при использовании глиноземсодержащих брикетов производства «РОИС» на низко- и среднеуглеродистых марках стали коэффициент распределения серы увеличивается на 23%, на высокоуглеродистых марках сталей на 20%;

- при использовании «РАНТАЛ 50 ГР» и/или глиноземсодержащих брикетов производства «РОИС» шлаки всех марок сталей насыщены по MgO ;

- активность насыщения по $MgO \cdot Al_2O_3$ на низко- и среднеуглеродистых марках стали в шлаковом расплаве достигается при добавке глинозем содержащего материала более 150 кг на плавку, что приводит к образованию защитного гарнисажа содержащего шпинель и, как следствие, к повышению стойкости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали;

- активность насыщения по $MgO \cdot Al_2O_3$ на высокоуглеродистых марках стали в шлаковом расплаве при различных добавках «РАНТАЛ 50 ГР» и/или гли-

ноземсодержащих брикетов производства «РОИС» не достигается и, для образования защитного гарнисажа на футеровке металлургических агрегатов АКП необходимо дополнительно вводить Al_2O_3 ;

- при использовании «РАНТАЛ 50 ГР» снижается вязкость шлаков, на низко- и среднеуглеродистых марках стали на 9,6%, на высокоуглеродистых марках стали на 8,1%;

- при использовании глиноземсодержащих брикетов производства «РОИС» снижается вязкость шлаков, на низко- и среднеуглеродистых марках стали на 10,2%, на высокоуглеродистых марках стали на 8,4%.

4.3 Промышленные испытания глиноземсодержащих материалов

С целью определения технологической целесообразности использования глиноземсодержащих материалов в качестве разжижителя шлака при внепечной обработке стали проведено испытание «Рантал 50ГР» производства ООО «Рантал» (г. Санкт-Петербург) и глиноземсодержащих брикетов производства «РОИС» (г. Екатеринбург).

Опытный материал «Рантал 50ГР» был использован на 93 плавках. В качестве сравнительных проанализированы аналогичные марки стали, на которых в качестве разжижителя шлака применялся плавиковый шпат (167 плавки) и шамот (163 плавки). Параметры плавки представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Технологические параметры опытных и сравнительных плавки

| Материал | Время обработки | Содержание серы, % | | Степень десульфурации, % | Расход материалов, кг/плавку | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|----------|--------------------------|------------------------------|------|-------|---------|-----------|
| | | Начальное | Конечное | | Рантал50ГР | Шпат | Шамот | Известь | Всего ТШС |
| Плавиковый шпат | 39 | 0,0171 | 0,0122 | 27,4 | - | 234 | - | 864 | 1098 |
| «Рантал 50 ГР» | 40 | 0,0165 | 0,0120 | 25,7 | 202 | - | - | 946 | 1148 |

При вводе «Рантал 50ГР» в ковш газовой выделении, барботажа и вспенивания шлака не происходило. В результате визуальной оценки шлака по ходу обработки

установлено, что опытный материал обладает удовлетворительной разжижающей способностью.

Из данных таблицы 4.10 видно, что при близких значениях технологических параметров (начальное содержание серы, время обработки, расход твердых шлакообразующих смесей) значения степени десульфурации при использовании плавикового шпата и «Рантал 50ГР» близки и составляют 27,4 и 25,7% соответственно; при использовании шамота степень десульфурации ниже и составляет – 18%.

Для определения изменения содержания Al_2O_3 в шлаке проводился отбор проб шлака до и после обработки на АКП. Также отбирались пробы шлака на плавках с использованием плавикового шпата.

Изменение среднего химического состава на опытных и сравнительных плавках показано в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Изменение среднего химического состава на опытных и сравнительных плавках

| Материал | Шлаки | Химический состав шлака, % | | | | |
|-------------|-------|----------------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|
| | | CaO | SiO ₂ | MgO | FeO | Al ₂ O ₃ |
| Рантал 50ГР | до | 39,0 | 23,1 | 9,3 | 3,6 | 12,8 |
| | после | 53,0 | 19,6 | 7,5 | 1,8 | 18,0 |
| Шпат | до | 36,9 | 29,2 | 7,9 | 2,9 | 8,6 |
| | после | 50,7 | 25,9 | 7,1 | 1,2 | 8,5 |

Из приведенных в таблице 4.11 данных видно, что при использовании плавикового шпата и шамота содержание Al_2O_3 в шлаке до и после обработки на АКП практически не меняется, а с применением материала «Рантал 50ГР» оно возросло, в среднем, на 5,2% (с 12,8 до 18,0%).

С целью определения влияния материала «Рантал 50ГР» на стойкость футеровки сталковшей в качестве разжижителя шлака использовался данный материал при ковшовой обработке всех плавов на сталковше № 23. Стойкость футеровки из огнеупоров производства ООО «Никомогнеупор» на опытной кампании составила 54,0 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа за 9 месяцев 2007 года 49,7 плавов.

При использовании глиноземсодержащего материала «Рантал 50ГР» достигнуты следующие результаты (приложение Д):

- при вводе материала в ковш газовой выделенной, барботажа и вспенивания шлака не происходило;
- материал «Рантал 50ГР» обладает удовлетворительной разжижающей способностью, но необходимая жидкоподвижность шлака с применением плавикового шпата достигается быстрее, чем при работе с опытным материалом;
- при использовании материала «Рантал 50ГР» содержание Al_2O_3 в шлаках после обработки на печь – ковше возросло, в среднем, на 5,2%;
- значения степени десульфурации стали при использовании материала «Рантал 50ГР» и плавикового шпата близки и составляют 25,7 и 27,4% соответственно; при использовании шамота – 18%;
- стойкость футеровки сталеразливочного ковша №23, выполненной из огнеупоров производства ООО «Никомогнеупор», на опытной кампании составила 54,0 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа за 9 месяцев 2007 года 49,7 плавков». Прирост в стойкости футеровки составил 8%;
- данный материал может быть использован в качестве заменителя плавикового шпата на всем сортаменте сталей.

В качестве разжижителя шлака при ковшовой обработке стали на АКП использовался глиноземсодержащий материал производства ОООИ РОИС (г. Екатеринбург).

Опытный материал применялся при ковшовой обработке металла, который подвергался вакуумной обработке. При этом средняя стойкость огнеупорных изделий четырех вакуум–камер производства «MWA» (Германия) составила 97,3 плавки против, при работе вакуум – камер без использования глиноземсодержащих брикетов, 69,3 плавков.

За указанный период глиноземсодержащие брикеты использовались на двух кампаниях вакуум–камеры № 1, зафутерованной огнеупорами производства «Dufenco», стойкость которых составила 104 и 131 плавку.

Средний износ огнеупорных изделий третьего кольца впускного патрубка составил: при использовании брикетов – 1,60 мм/пл., без брикетов – 2,58 мм/пл.

Визуально оценивалось состояние шлака по ходу обработки – опытный материал имел высокую разжижающую способность.

Глиноземсодержащие брикеты были испытаны на 571 плавке различных марок сталей. Расход опытного материала изменялся от 1,0 до 2,6 кг/т стали и в среднем составил 1,8 кг/т стали.

Технологические параметры опытных и сравнительных плавков приведены в таблицах 4.12 и 4.13.

Таблица 4.12 – Технологические параметры опытных и сравнительных плавков

| | Количество плавков, шт. | Время обработки, мин. | Содержание Р, % | | Содержание S, % | | Степень десульфурации. % | Расход опытного материала | Расход всех шлакообразующих мате- |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| | | | До обработки | После обработки | До обработки | После обработки | | | |
| Опытные плавки | 571 | 40 | 0,013 | 0,014 | 0,021 | 0,012 | 42,9 | 1,8 | 9,4 |
| Сравнительные плавки | 577 | 44 | 0,012 | 0,013 | 0,020 | 0,013 | 35,0 | - | 10,3 |

Из анализа данных, представленных в таблицах 4.27 и 4.13 следует, что при одинаковом времени обработки металла на АКП и близком расходе твердых шлакообразующих смесей, степень десульфурации, на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 против 35,0). Это можно объяснить содержанием в опытном материале металлического алюминия, который способствует более глубокому раскислению шлака, и высокой разжижающей способностью опытного материала. На сравнительных плавках за время обработки среднее содержание Al_2O_3 в шлаках изменялось незначительно. На опытных плавках содержание Al_2O_3 возросло с 8,8 до 14,9 %.

При использовании глиноземсодержащих окатышей производства ОООИ «РОИС» достигнуты следующие результаты (приложения Е, Ж):

- опытный материал имеет высокую разжижающую способность;

Таблица 4.13 – Изменение химического состава шлака на опытных и сравнительных плавках

| | Шлаки | Количество плавков | Массовая доля, % | | | | | Основность |
|----------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|------------|
| | | | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | |
| Опытные плавки | До обработки | 571 | 32,3 | 26,9 | 8,8 | 9,0 | 3,3 | 1,2 |
| | После обработки | | 49,2 | 24,1 | 14,9 | 8,7 | 1,1 | 2,04 |
| Сравнительные плавки | До обработки | 577 | 36,9 | 29,2 | 8,6 | 7,9 | 2,9 | 1,26 |
| | После обработки | | 50,7 | 25,9 | 8,5 | 7,1 | 1,2 | 1,96 |

- степень десульфурации на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 % против 35,0 %);
- среднее содержание Al₂O₃ в обычных шлаках изменялось незначительно от 8,6 до 8,5%, на опытных плавках содержание Al₂O₃ возросло с 8,8 до 14,9%;
- удельный износ огнеупоров впускного патрубка вакуум-камер снизился с 2,58 до 1,60 мм/пл., в среднем на 37,9%;
- средняя стойкость футеровки вакуум – камер повысилась на 39,4%, с 69,8 до 97,3 пл.

4.4 Выводы к главе 4

1. Проведены испытания по использованию глиноземсодержащих материалов в качестве разжижителя шлака при ковшовой обработке стали на АКП. Показано, что:

- степень десульфурации на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 % против 35,0 %);
- среднее содержание Al₂O₃ в обычных шлаках изменялось незначительно от 8,6 до 8,5%, на опытных плавках содержание Al₂O₃ возросло с 8,8 до 14,9%;

2. При использовании глиноземсодержащего материала производства ОООИ «РОИС» достигнуты следующие результаты:

- удельный износ огнеупоров впускного патрубка вакуум-камер снизился с 2,58 до 1,60 мм/пл., в среднем на 37,9%;

- средняя стойкость футеровки вакуум-камер повысилась на 39,4%, с 69,8 до 97,3 пл.

3. При использовании глиноземсодержащего материала «РАНТАЛ 50 ГР» производства ООО «РАНТАЛ» стойкость футеровки сталеразливочного ковша №23, выполненной из огнеупоров производства ООО «Никомогнеупор», на опытной кампании составила 54,0 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа за 9 месяцев 2007 года 49,7 плавков. Прирост в стойкости футеровки составил 8%;

4. Установить норму расхода глиноземсодержащего материала на АКП в количестве 1,8-2,0 кг/т стали (273-304 кг/пл.) взамен ОКД (Приложение Е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ литературных источников по вопросам стойкости огнеупорной футеровки металлургических агрегатов. Показано, что для решения задачи повышения стойкости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали необходим комплексный подход, направленный не только на повышение качества огнеупорных изделий и улучшение дизайна футеровки, но и на технологию наведения рафинировочного шлака, который с одной стороны подвергает химическому износу огнеупоры шлакового пояса, и в тоже время с другой стороны при определенных составах способен формировать защитный шлаковый гарнисаж на огнеупорах стен, своего рода расходую футеровку.

2. Проведены исследования структуры периклазохромитовых огнеупоров предназначенных для циркуляционных вакууматоров:

- методом сопоставления структуры огнеупорных изделий с их стойкостью и удельным износом показано, что наибольшая стойкость достигается на изделиях, в которых микроструктура наименее измененной зоны сложена зернами плавленного периклазохромита размером 300-2400 мкм с преобладанием монокристаллического строения. В межкристаллическом пространстве силикаты представлены монтичеллитом и мервинитом, а также присутствуют в виде округлых или заovalенных включений в основном размером 20-80 мкм. Периклазохромит равномерно насыщен крупными включениями вторичного хромшпинелида размерами 10-30 мкм. Тонкомолотая составляющая состоит из частиц плавленного периклазохромита размером 30-150 мкм. Зёрна хромита хорошо контактируют с другими частицами, образуя общий хорошо спеченный каркас. Между частицами присутствуют силикатные (монтичеллитные) пленки шириной до 10 мкм. Связь зёрен периклазохромита и хромита с тонкомолотой составляющей хорошая, прямая;

- установлено, что изделия, имеющие прочность при сжатии не менее 70 Н/мм^2 , кажущуюся пористость не более 13% и содержание оксида кремния не

более 0,6%, в условиях эксплуатации ККЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» циркуляционных вакууматоров показывают максимальную стойкость. Т.е. изделия с высокой механической прочностью и низкой кажущейся пористостью позволяют формировать на поверхности футеровки защитный гарнисаж, свойства которого будут зависеть от состава шлака. Подбирая рациональный состав шлака, можно добиться, что бы защитные свойства осаждающегося гарнисажа были максимальными без потери его рафинирующих свойств.

Применение данных огнеупорных изделий в ККЦ ОАО «ЕВРАЗ НТМК» позволило увеличить время эксплуатации вакуум-камеры на 10-15%, что подтверждено заключениями о внедрении в производство. В настоящее время огнеупорные изделия с рациональными физико-химическими свойствами применяются в футеровках циркуляционных вакууматоров на ведущих предприятиях России: ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и ОАО «ММК», что подтверждено актами и заключениями о внедрении в производство.

3. Рассмотрены варианты дизайна футеровки вакуум-камеры. Предложены и внедрены технологические решения по изменению дизайна футеровки вакуум-камеры:

- с целью повышения стойкости внутренней футеровки впускного патрубка, была изменена схема расположения сопел подачи нейтрального газа. Увеличено количество сопел с 10 до 12. Взаимно противоположное расположение форсунок снижает динамическое воздействие струи аргона на внутреннюю футеровку впускного патрубка;

- рабочая футеровка впускного патрубка подвергается наиболее жестким условиям эксплуатации. При обработке металла происходит разрушение верхнего кольца (в районе перемычки) с последующим его вымыванием и прекращением эксплуатации вакуум камеры, что составляет 15 % преждевременного вывода вакууматора на ремонт. Для исключения данного типа износа, было введено усиление в футеровку в районе перемычки. После внедрения данной схемы футеровки всплытие пятого кольца не наблюдалась;

- усиление металлоконструкции патрубка позволило снизить количество разгаров внутренней рабочей футеровки и повысить надежность работы вакуум-камеры;

- данные решения позволили уменьшить количество аварийных выводов вакуум-камер из работы, повысить время их эксплуатации на 10-15% и стабилизировать процесс выплавки транспортного металла, что подтверждено актами внедрения.

4. Проведены исследования по подбору рационального состава шлака, наводимого в сталковше при ковшовой обработке стали, обладающего низкой агрессивностью к футеровке и достаточными рафинирующими свойствами.

4.1. Подтверждено, что для снижения агрессивного воздействия шлака на футеровку сталковшей, необходимо увеличивать содержание в нем MgO до предела насыщенности, но не более, т.к. избыток MgO перейдет в твердую фазу, с гетерогенизацией системы, что негативно отразится на рафинирующей способности шлака.

4.2. Определены границы насыщения шлака по MgO в зависимости от содержания в шлаке оксидов в следующих пределах: CaO от 40 до 55%, SiO_2 от 14 до 32 % и Al_2O_3 от 4 до 27%. Повышение содержания Al_2O_3 в гомогенной составляющей шлака уменьшает уровень насыщения шлака по MgO , что благоприятно скажется на стойкости футеровки металлургических агрегатов на участке КОС.

4.3. Рассмотрен вопрос об условиях выделения шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ на поверхности огнеупоров в защитном гарнисаже. Показано, что для образования защитного гарнисажа, содержащего шпинель, необходимо повышать содержание в шлаке MgO до предела насыщения и Al_2O_3 более 15 %.

4.4. Проанализирован тепловой режим системы «металл-шлак-футеровка» на АКП. Впервые показано, что в различные периоды плавки на АКП, температура шлака в разных точках может отличаться от температуры металла. В период нагрева металла температура шлака вблизи электродов превышает температуру стали более 55 °С. Температура шлака на расстоянии 10-15 см от футеровки меньше на 10°С средней температуры шлака в независимости от периода нагрева

металла. В период нагрева металла температура шлака повышается и уровень насыщения по MgO увеличивается. С использованием этих новых данных, показано, что для достижения нового уровня насыщения по MgO можно добавлять магнийсодержащие материалы или снижать предел насыщения. Первый путь не целесообразен, т.к. после окончания нагрева температура шлака снижается и выравнивается с температурой металла. Введенный MgO выделится в виде твердой фазы, что приведет к повышенной гетерогенизации шлака. Второй путь – это снижение предела насыщения шлака по MgO, что достигается путем повышения содержания в шлаке Al_2O_3 . Данный путь более целесообразен, т.к. глиноземсодержащий материал может применяться и в качестве разжижителя шлака, взамен ОКД. Фактически, это единственный способ снижения агрессивности шлака в период его значительного перегрева. Кроме того, это повышает интенсивность выделения магнезиальной шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ в защитном гарнисаже.

4.5. На основании проведенных исследований подобраны и испытаны шлакообразующие материалы на основе Al_2O_3 , способные придать шлаку хорошие рафинирующие свойства за счет повышения степени десульфурации и более высокой жидкоподвижности. Проведены промышленные испытания глиноземсодержащих материалов «Рантал 50 ГР» и глиноземсодержащих брикетов производства ОООИ «РОИС», при этом выявлено:

- степень десульфурации на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 % против 35,0 %);
- повысилась стойкость футеровки вакуум-камер с 69,8 до 97,3 плавков (в среднем на 39,4 %);
- стойкость стальной на опытной кампании составила 54,0 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа 49,7 плавков (в среднем прирост в стойкости футеровки составил 8%).

4.6. На основании положительных результатов испытания глиноземсодержащих материалов принято решение установить норму расхода глиноземсодержащего материала «Рантал 50 ГР» на АКП в количестве 1,8-2,0 кг/т стали (273-304 кг/пл.) взамен ОКД.

5. При внедрении технологических мероприятий, огнеупорных изделий с рациональными физико-химическими показателями и применения глиноземсодержащих материалов для разжижения шлака и придания ему рафинирующих свойств, стойкость футеровок сталковшей и вакуум-камер повысилась на 8 и 60% соответственно. Экономический эффект от внедрения данных мероприятий составил 64,8 млн. руб. в год или 14,4 руб/т стали. Таким образом, прирост количества научно-технических данных о процессе ковшевой обработки реализовался приростом ее технико-экономической эффективности.

1. Бигеев, А. М. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали* [Текст] : учеб. для вузов / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544 с.
2. Кудрин, А. В. *Теория и технология производства стали* [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Кудрин. – М. : Мир, ООО Издательство АСТ, 2003. – 528 с.
3. Явойский, В. И. *Металлургия стали* [Текст] : учеб. для вузов / В. И. Явойский, Ю. В. Кряковский, В. П. Григорьев, Ю. М. Нечкин, В. Ф. Кравченко, Д. И. Бородин. – М. : Metallurgy, 1983. – 584 с.
4. Кнюппель, Г. *Раскисление и вакуумная обработка стали. Термодинамические и кинетические закономерности* [Текст] / Г. Кнюппель – М. : Metallurgy, 1973. – 312 с.
5. Великин, Б. А. *Футеровка сталеразливочных ковшей* [Текст] / Б. А. Великин, А. К. Карклит, С. В. Колпаков, Ю. Д. Кузнецов, Ю. А. Полонский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1990. – 248 с.
6. Чигведу, Ч. *Использование технологии разбрызгивания шлака для снижения интенсивности торкретирования и сокращения затрат на огнеупоры* [Текст] / Ч. Чигведу, Й. Кемпкен // *Черные металлы*. – 2006. – Март. – С. 62 – 68.
7. Шалимов, А. Г. *Раздув шлака в кислородном конвертере емкостью 300 т на фирме «Baо Steel» и кристаллографическая структура шлака* [Текст] / А. Г. Шалимов // *Новости черной металлургии за рубежом*. – 2001. – № 2. – С. 48 – 49.
8. Mills, K. *A review of slag splashing* / K. Mills, Y. Su, A. Fox, Z. Li, R. Thackray, H. Tsai // *ISIJ International*. – Vol. 45 (2005). – № 5. – P. 619 – 633.
9. Дьяченко, В. Ф. *Пути достижения стойкости футеровки конвертеров более 5000 плавов* [Текст] / В. Ф. Дьяченко, И. М. Захаров, В. Г. Овсянников, Т. К. Прищепова, О. Б. Воронина // *Сталь*. – 2007. – №2. – С. 51 – 53.

10. Серова, Л. В. Исследование оксидноуглеродистых огнеупоров – направление выработки требований к поставщикам [Текст] / Л. В. Серова, Е. В. Чудинова // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №6. – С. 27 – 32.
11. Берг, Х. Влияние внепечной обработки на износ футеровки сталеразливочных ковшей [Текст] / Х. Берг, Р. Герлинг // Черные металлы. – 2005. – июнь. С. 27 – 32.
12. Очагова, И. Г. Совершенствование футеровки ковшей для разливки и внепечной обработки стали за рубежом [Текст] / И. Г. Очагова // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2008. – №2. – С. 89 – 93.
13. Очагова, И. Г. Совершенствование футеровки ковшей для разливки и внепечной обработки [Текст] / И. Г. Очагова // Новые огнеупоры. – 2007. – №3. – С. 17 – 18.
14. Турунов, Д. Н. Повышение эффективности применения огнеупоров в футеровке У КП [Текст] / Д. Н. Турунов, Е. Н. Дымченко, А. Г. Коваленко // Сталь. 2007. – №11. – С. 38 – 40.
15. Гош, Н. К. Увеличение срока службы сталеразливочного ковша, футерованного огнеупорами $MgO - C$ и $Al_2O_3 - MgO - C$ [Текст] / Н. К. Гош, М. К. Кужур, П. К. Ройчоудхурм, С. К. Гарай, С. Мухежи, С. К, Банержи, Л. Тивари // Новые огнеупоры. – 2011. – № 9. – С. 5 – 8.
16. Левада, Д. Н. Опыт службы огнеупорных изделий в ОАО ЧМК [Текст] / А. Г. Левада, Д. Н. Макаров, В. И. Антонов // Сталь. – 2007. – №9. – С. 37 – 41.
17. Кулик, А. Д. Состояние и тенденции совершенствования футеровки и сменных огнеупорных изделий сталеразливочных ковшей на металлургических предприятиях Украины. Разливка стали на МНЛЗ [Текст] / А. Д. Кулик, А. П. Огурцов, К. А. Мусиенко, В. П. Полетаев, Т. М. Титова // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2005. – №7. – С. 53 – 55.
18. Смирнов, А. Н. Исследования износа футеровки агрегата ковш – печь в условиях современного металлургического мини – завода [Текст] / А. Н. Смирнов, А. Я. Минц, Р. В. Гиниятуллин // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2001. – №10. – С. 40 – 47.

19. Можжерин, А. В. Эволюция дизайна и стойкости футеровки 150-т сталеразливочных ковшей [Текст] / А. В. Можжерин, В. А. Мусевич, А. П. Дука, А. П. Маргишвили, А. А. Пайвин, В. В. Казаков // Новые огнеупоры. 2009. – №1. – С. 5 – 14.
20. Совершенствование огнеупоров для сталеразливочных ковшей на заводе в Касиме [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2005. – №2. С. 77 – 79.
21. Повышение стойкости огнеупоров в днище ковша установки VOD [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2005. – №2. С. 75 – 76.
22. Этапы повышения стойкости футеровки ковшей [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2004. – №5. С. 86 – 87.
23. Технология обслуживания ковшей для установки ковш – печь [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2004. – №4. С. 79 – 83.
24. Оптимизация футеровки ковшей для комплексной обработки стали [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2004. – №5. С. 81 – 83.
25. Продление кампании сталеразливочных ковшей на заводе фирмы «Bethlehem steel» в Спарроус – пойнте [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2004. – №4. С. 77 – 79.
26. Технология обслуживания и удлинение срока службы футеровки сталеразливочных ковшей и циркуляционных вакууматоров [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2004. – №4. С. 73 – 76.
27. Применение высокоглиноземистого шпинелеобразующего бетона в ковше установки VAD [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. . – 2007. – №1. С. 100 – 102.
28. Томия, Х. Разработка безобжигова Al_2O_3 кирпича для футеровки сталеразливочного ковша [Текст] / Х. Томия, Х. Тада, Э. Нида, Р. Накамура,

Ф. Эдвардз, Д. Мэтьюз, Д. Эмесс // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №10. – С. 60 – 63.

29. Маргишвили, А. П. Совершенствование дизайна и повышение стойкости футеровки поставок ОАО ВКО для 90-т сталеразливочных ковшей ЗАО «МЗ «Петросталь» [Текст] / А. П. Маргишвили, А. В. Можжерин, В. А. Мусевич, А. П. Дука, А. И. Соколов, А. Н. Бубнов, О. А. Саломахин // Новые огнеупоры. – 2011. – №1. – С. 5 – 9.

30. Харин, А. К. Освоение технологии производства периклазоуглеродистых огнеупоров в ОАО «ММК им. Ильича» [Текст] / А. К. Харин, А. И. Белкин, В. С. Ворошилин, В. Н. Белик // Сталь. – 2007. – №1. С. 28 – 30.

31. Кононов, В. А. Повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей мартеновского производства ЗАО МЗ «Петросталь» [Текст] / В. А. Кононов, Н. В. Коновнов, С. Н. Шкробов, О. А. Саломахин // Новые огнеупоры. – 2009. – №4. – С. 66 – 72.

32. Просви́ров, С. Н. Совершенствование огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей [Текст] / С. Н. Просви́ров, Д. А. Калинин, М. Е. Савкин // Новые огнеупоры. – 2007. – №7. – С. 18 – 19.

33. Гареев, Р. Р. Опыт эксплуатации футеровок основных металлургических агрегатов в ОАО ЧМК [Текст] / Р. Р. Гареев, А. Н. Белоусов // Новые огнеупоры. – 2008. – № 11. – С. 13 – 17.

34. Долгополов, В. Ф. Применение тиксотропных масс для сталеразливочных ковшей [Текст] / В. Ф. Долгополов, В. В. Конюхов, А. В. Кузнецов, А. В. Кутаков, Г. А. Лозин // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 1998. – №11-12. С. 70 – 74.

35. Яковенко, А. Футеровка сталеразливочных ковшей мартеновского цеха [Текст] / ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2006. – №5. С. 53 – 54.

36. Очагова, И. Г. Огнеупоры для черной металлургии в Японии [Текст] / И. Г. Очагова // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2004. – №3. С. 71 – 74.

37. Просвиров, С. Н. Опыт использования импортных огнеупоров в сталеплавильном производстве ОАО ОЭМК [Текст] / С. Н. Просвиров, Е. И. Гонтарук, Ю. А. Затаковой, Д. А. Калинин, А. В. Луговский // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 1999. – №1-2. С. 68 – 70.
38. Просвиров, С. Н. Совершенствование футеровки сталеразливочных ковшей / С. Н. Просвиров, Д. А. Калинин, М. Е. Савкин // Новые огнеупоры. – 2007. – №3. – С. 68 – 69.
39. Sarkar, S. Introduction of alumina magnesia (AM) spinel forming high alumina castable in VAD ladle / S. Srkar, P. Nandi, D. Halder // AISTech 2006 Proceedings. – 2006. – №1. – С. 803 – 808.
40. Kinoshita, S. Extension of campaign life in 140ton if ladle / S. Kinoshita, M. Fukunaga // Proceedings of UNITECR 2003 Congress. Osaka, Japan. – 2003. – С. 681 – 683.
41. Katsube, Y. Maintenance technologies for ladle furnace / Y. Katsube, K. Okita, M. Tahara // Journal of the Technical Association of Refractories, Japan. – 2003. – №23. С – 179 – 184.
42. Mitsuo, S. Improvement of Steel Ladle Refractories At Kashima Steel Works / S. Mitsuo, M. Takashi // SEASIS Quarterly. – 2003. – №4. С. – 29 – 36.
43. Mitsuaki, I. Development and Use of Ultra-Low MgO – C Nano-Tech Refractories / I. Mitsuaki, T. Yamamoto, K. Hirota // Journal of the Technical Association of Refractories, Japan. – 2006. – №3. – С. – 238.
44. Грете, У. Применение монолитной футеровки в шлаковом поясе сталеразливочного ковша емкостью 220 т [Текст] / У. Грете, К. Шлютер, Е. Пишке, Х. Берг // Черные металлы. – 2003. – Июнь. С. 34 – 39.
45. Shibata, T. Free water in castable and its Electrical Conductivity / T. Shibata, K. Yamamoto, C. Tashiro // Stahl und Eisen. – 1996. – Oktober. – С. 192 – 195.
46. Hogan, W. The steel mill of the next centure / W. Hogan // Steel Technology International. – 1996-1997. С. 13 – 16.
47. Акселерод, Л. М. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок [Текст] : в 2 т. / Л. М. Акселерод, Г. И. Антонов, Е. Е. Грищенко,

В. Л. Гузовский, И. Д. Кашеев, В. М. Кравчук, А. Г. Лузин, В. А. Перепелицин, О. Н. Попов, А. Н. Пыриков, В. Г. Селянко, Л. В. Узберг, Л. С. Фролова, О. Ф. Шатилов – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 2 т. – 656 с.

48. Крикунов, Б. П. Совершенствование способов фиксации футеровки в корпусе сталеразливочного ковша агрегата печь – ковш [Текст] / Б. П. Крикунов, Д. В. Колесников, Н. М. Переворочаев, А. И. Дрейко, В. А. Романов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 82 – 85.

49. Колпаков, С. В. Опыт эксплуатации машины «Орбита» и сталеразливочных ковшей емкостью 130 – 200 т с монолитной футеровкой из набивных и огнеупорных масс [Текст] // *Сталь*. – 1970. – №6. – С. 513 – 516.

50. Магнезиальноглиноземистые шпинели [Текст] / ОАО Черметинформация. *Новости черной металлургии за рубежом*. . – 2006 – №6. – С. 86 – 90.

51. Ramana, M. V. Magnesia-alumina spinels in action / M. V. Ramana // *Industrial Minerals*. – 2006. – №1. – С. 51 – 51. /*

52. Коррозионная стойкость глиноземистых бетонов для ковшей [Текст] / ОАО Черметинформация. *Новости черной металлургии за рубежом*. . – 2004 – №1. – С. 77 – 78.

53. Периклазоуглеродистые изделия, изготовленные по нанотехнологии [Текст] / ОАО Черметинформация. *Новости черной металлургии за рубежом*. . – 2005 – №1. – С. 86 – 90.

54. Технологические изменения периклазоуглеродистых изделий для сталеразливочных ковшей в Аргентине [Текст] / ОАО Черметинформация. *Новости черной металлургии за рубежом*. . – 2004. – №1. С. 71 – 75.

55. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов: учебное пособие для вузов [Текст] // К. К. Стрелов, И. Д. Кашеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1996. – 608 с.

56. Кашеев, И. Д. Исследование углеродсодержащих огнеупоров для агрегатов сталеплавильного производства [Текст] / И. Д. Кашеев, К. Г. Земляной, Э. А. Вислогузова, Л. В. Серова // *Новые огнеупоры*. – 2007. – №10. – С. 22 – 25.

57. Петренко, Ю.П. Зависимость стойкости футеровок сталеразливочных ковшей от показателей качества огнеупоров [Текст] / Ю. П. Петренко, Э. А. Вислогузова, Л. В. Серова // Новые огнеупоры. – 2008. – №6. – С. 6 – 9.

58. Определение дополнительных физико-химических и технологических свойств огнеупорных материалов изделий отечественного и зарубежного производства [Текст]: аннотированный отчет / И. Д. Кашеев – Екатеринбург : Федеральное агентство по образованию РФ ГОУ ВПО УрФУ – УПИ. – 2006. – 28 с.

59. Серова, Л. В. Формирование коррозионноустойчивой структуры корундопериклазоуглеродистых огнеупоров для сталеразливочных ковшей [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.17.11 : защищена 3.10.11 : утв. 28.04.12 / Серова Людмила Викторовна. – Екатеринбург, 2011. – 194 с.

60. Касьян, Г. И. Возможность повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей при использовании магнезиальных шлакообразующих добавок [Текст] / Г. И. Касьян, А. Я. Минц // Новые огнеупоры. – 2008. – №3. – С. 70 – 71.

61. Крикунов, Б. П. Возможности повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей при использовании магнезиальных шлакообразующих добавок [Текст] / Б. П. Крикунов, Н. М. Переворочаев, В. И. Цуканов, А. И. Дрейко, В. Р. Барановский, М. В. Рыжов, А. А. Астахов // Металл и литье Украины. – 2009. – №1-2. – С. 23 – 26.

62. Акселерод, Л. М. Внедрение технологии использования MgO – CaO флюса в качестве модификатора шлака в сталеразливочных ковшах конверторного цеха ОАО «МК Азовсталь» [Текст] / Л. М. Акселерод, В. А. Устинов, А. А. Травинчев, Н. А. Вожол, И. Н. Костыря // Новые огнеупоры. – 2011. – №6. – С. 52 – 54.

63. Акселерод, Л. М. Использование флюса в сталеразливочных ковшах конвертерного цеха ОАО МК Азовсталь [Текст] / Л. М. Акселерод, В. А. Устинов, А. А. Травинчев, Н. А. Вожол, И. Н. Костыря // Metallurgical and Mining Industry. – 2001. – №4. С 17 – 19.

64. Оржех, М. Б. Практика применения магнезиальных модификаторов шлака в электросталеплавильных печах и сталеразливочных ковшах [Текст] / М.

Б. Оржих, Л. М. акселерод, М. Ю. Турчин, Б. Б. Либанов, Н. С. Анашкин, Ю. Н. Соляник, И. А. Зайцев, В. Г. Новиков, Н. Е. Зубарев // Новые огнеупоры. – 2011. – №6. – С. 56 – 58.

65. Касьян, Г. И. Возможность повышения стойкости футеровки сталеплавильных ковшей при использовании магнезиальных добавок [Текст] // И. Г. Касьян, И. Г. Минц // Новые огнеупоры. – 2008. – №10. – С. 13 – 16.

66. Новиков, В. К. Полимерная природа расплавленных шлаков [Текст] : учеб. пособие / В. К. Новиков, В. Н. Невидимов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ. – 2006. – 62 с.

67. Кньюппель, Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии [Текст] / Г. Кньюппель – М. : Металлургия, 1984. – 414 с.

68. Фролов, В. И. Опыт реконструкции комбинированной установки вакуумирования стаи в конвертерном цехе [Текст] / В. И. Фролов, Ю. А. Бодяев, О. А. Николаев, Н. В. Бурзайкин, С. А. Самойлин // Сталь. – 2004. – №4. – С. 25 – 27.

69. Сычев, А. Ф. О некоторых аспектах эксплуатации вакуумных установок ОАО ММК [Текст] / А. Ф. Сычев, В. Ф. Коротких, В. Н. Кунгурцев // Сталь. – 2002. – №12. – С. 11 – 15.

70. Бодяев, Е. В. Вакуумирование стали процессом RH на Магнитогорском металлургическом комбинате [Текст] / Ю. А. Бодяев, Е. В. Бурмистрова, В. Г. Овсянников, А. Д. Носов, С. А. Самойлин // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2004. – №1. С. 78 – 80.

71. Совершенствование технологии ремонта погружных патрубков для внепечного рафинирования [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2004. – №1. С. 78 – 80.

72. Сарычев, А. Ф. Опыт эксплуатации вакуумной установки [Текст] / А. Ф. Сарычев, В. Ф. Коротких, В. И. Фролов, А. Д. Носов, В. В. Фролов // Сталь. – 1999. – №11. – С.20 – 21.

73. Mondari, T. Optimized refractory solution for high performance ladles and RH-degassers / T. Mondari, R. Reiterer, A. Viertauer, R. Exenberger // 4th European Oxygen Steelmaking Conference. Austria, Graz. – 2003. P. 153 – 162.

74. Tahara, M. Improvement repair method for snorkel of secondary refining / M. Tahara, K. Okita // Taikabutsu=Refractories. – 2003. – №1. С. 31 – 32.

75. Носов, А. Д. Служба огнеупоров в комбинированной установке вакуумирования стали на ОАО ММК [Текст] / А. Д. Носов, В. Г. Овсянников, Е. В. Мурашко // Огнеупоры и техническая керамика. – 1998. - №10. – С. 32 – 34.

76. Замена периклазохромитовых огнеупоров на вакуумных установках рафинирования коррозионностойких сталей [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2004. – №5. С. 84 – 85.

77. Соловувкова, Г. Э. Состояние дел и перспективы развития огнеупоров для основных переделов черной металлургии. Футеровка установок внепечного вакуумирования стали [Текст] / Г. Э. Соловувкова, М. А. Бурова, И. Ф. Масовер, И. Г. Очагова // Огнеупоры. – 1990. – №6. – С. 58 – 61.

78. Сибикин, А. Б. Влияние параметров структуры огнеупоров на их пропитку шлаком в установках вакуумирования стали [Текст] / А. Б. Сибикин, Е. С. Борисовский, Ф. С. Каплан, Е. А. Прокофьева, С. М. Эпштейн // Огнеупоры. – 1990. – №10. – С. 1 – 7.

79. Ботьянский, А. В. О механизме износа огнеупоров в патрубке циркуляционного вакууматора [Текст] / А. В. Болтянский, В. Ю. Прокудин // Огнеупоры. – 1991. – №10. – С. 30 – 31.

80. Соколов, А. Н. Периклазошпинельные изделия на основе спеченных материалов для установок внепечного вакуумирования стали [Текст] / А. Н. Соколов, О. В. Квятковский, Е. С. Борисовский, Г. И. Кузнецов, Л. В. Постникова, В. В. Загнойко, В. Н. Коптелов, Л. А. Войникова, Л. Д. Бочаров, В. В. Трофимов, В. В. Чуйков, А. М. Скуридин // Огнеупоры. – 1991. – №7. – С. 32 – 36.

81. Характер износа периклазоуглеродистых изделий в нижней части камеры циркуляционного вакууматора [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2005. – №1. С. – 75.

82. Овсянников, В. Г. Огнеупоры фирмы Mauseron для установок вакуумирования стали [Текст] / В. Г. Овсянников, С. Г. Сенников, В. Н. Жириков, Г. А. Фараонов, С. Н. Фокин // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №8. – С. 52 – 56.

83. Оценка устойчивости к гидратации периклазоуглеродистых изделий для циркуляционных вакууматоров [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2004. – №4. С. 83 – 85.

84. Suto, M. Wear of MgO bricks used for RH degasser / M. Suto, Y. Kawata // Taikabutsu=Refractories. – 2004. – №3. – P. 125. 81

85. Parada, S. Substitution of Magnesia – chromite Refractory Materials in a Vacuum Refining Gumace for the Production of Stainless Steel / S. Parada, S. Smets, J. Weytjens // Proceeding of UNITECR`2003 Congress. – Japan. – Osaka. – 2003. – P. 122 – 125.

86. Механизм износа периклазохромитовых изделий с прямой связью в процессе RH-ТОВ [Текст] / Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2006. – №4. С. – 93 – 95.

87. Разработка огнеупорных бетонов для циркуляционных вакууматоров [Текст] / Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2006. – №2. С. – 87 – 90.

88. Повышение стойкости футеровки нижней части камеры циркуляционного вакууматора [Текст] / Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2007. – №6. – С. 93 – 94.

89. Ровнушкин, В. А. Исследование составов ковшевого шлака и огнеупоров на стойкость футеровки вакууматора RH [Текст] / А. В. Ровнушкин, Э. А. Вислогузова, С. А. Спирин, Е. В. Шеховцов, В. В. Кром // ОАО Черметинформация. Бюллетень Черная металлургия. – 2005. – №4. – С. 47 – 50.

90. Ровнушкин, В. А. Исследование влияния составов ковшевого шлака и огнеупоров на стойкость футеровки вакууматора RH [Текст] / В. А. Ровнушкин, Э. А. Вислогузова, С. А. Спириин, Е. В. Шеховцов, В. В. Кром, А. А. Метелкин // Новые огнеупоры. – 2005. – №3. – С. 33 – 36.

91. Kim, D. H. Wear of direct-bonded magnesia – chrome ore refractories in the RH-TOB / D. H. Kim, S. H. Yoo, C. S. Ha // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2005. – №6. P. 405 – 408.

92. Okada, H. Improvement of №1 RH campaign life for lower vessel in Kakogawa Works / H. Okada, T. Kamiyama, S. Maeda // Zairoy to prosesu = CAMP ISIJ. – 2007. – №20. С. – 163.

93. Корюков, Д. В. Опыт повышения стойкости вакууматора на ОАО НТМК [Текст] / Корюков Д. В // Технологии и оборудование для производства огнеупоров. Использование новых видов огнеупорных изделий в металлургической промышленности : материалы междунар. конф. – М.: Теплоэнергетик, 2005. – с. 134.

94. Гартен, Л. Усовершенствование технологии вакуумирования в сталеплавильном цехе Дортмунд фирмы Круп Хеш Шталь [Текст] / Л. Гартен, З. Грешупп // Черные металлы. 1997. – Январь. С. 36 – 42.

95. Результаты применения бесхромистых изделий в нижней части вакууматоров RH [Текст] / ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом. – 2001. – №4. – С. 90 – 91.

96. Shimizu, K. Chrome free brick applied to lower vessel of RH degasser / K. Shimizu, T. Hokii, K. Asano // Taikabutsu=Refractories. – 2001. – №2. – С. 84 – 85.

97. Романовский, Л. Б. Огнеупоры на основе спеченного и плавленного периклазохромита [Текст] / Л. Б. Романовский, В. А. Терехин, А. М. Чуклай, В. М. Бибаев, В. Н. Коптелов // Огнеупоры. – 1991. – №1. С. 18 – 19.

98. Метелкин, А. А. Способы повышения стойкости футеровки вакууматора [Текст] / XXXVI научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «НТМК», – 2004. – С. 263.

99. Кромм, В. В. Способы повышения стойкости футеровки вакуум - камеры [Текст] / В. В. Кромм, А. А. Метелкин // Технологии и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали : материалы междунар. конф. – М.: Теплоэнергетик, 2006. – С. 219.

100. Метелкин, А. А. Способы повышения стойкости и надежности работы футеровки вакуум – камеры / XXXVII научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «НТМК». – 2005. – с. 214.

101. Метелкин, А. А. Технология ремонта и способы повышения стойкости футеровки вакуум – камеры [Текст] / А. А. Метелкин, Д. В. Корюков, В. Н. Сергеев // Новые огнеупоры. – 2006. – №3. – С. 10 – 11.

102. Шешуков, О. Ю. Увеличение времени эксплуатации и надежности работы вакуум – камер [Текст] / О. Ю. Шешуков, С. В. Виноградов, Э. А. Вислогузова, В. В. Левчук, А. С. Ткачев, А. А. Метелкин, И. В. Некрасов // Сталь. – 2012. – №1. – С. 20 – 21.

103. Погружной патрубок для вакууматора [Текст] : полезная модель 96574 Рос. Федерация : МПК7 С 27 С 7 / Сергеев В. Н, Савкин К. А., Метелкин А. А., Корюков Д. В., Данилин Ю. А., Вислогузова Э. А., Вайлет А. А. ; заявитель и владелец модели ОАО «НТМК», № 2010101558; заявл.19.01.2010 ; опубл. 10.08.2010, Бюл.№22

104. Метелкин, А. А. Способы повышения стойкости футеровки циркуляционных вакууматоров в условиях «ЕВРАЗ НТМК» [Текст] / А. А. Метелкин, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, Э.А. Вислогузова, В.М. Кулик, В. В. Левчук // Сталь. – 2013. – №9. – С. 49 – 52.

105. Вислогузова, Э. А. Исследование влияния технологических факторов вакуумирования и качества периклазохромитовых огнеупоров на их износоустойчивость в футеровке вакуум – камер [Текст] / Э. А. Вислогузова, А. А. Метелкин, Л. В. Зорхина, И. Г. Маряsev, Д. А. Терешенко. Л. М. Михайловская // Новые огнеупоры. – 2006. – №9. – С. 35 – 38.

106. Вислогузова, Э. А. Прогнозирование стойкости рабочей футеровки вакуум – камеры. ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» [Текст] / Э. А. Вислогузова, А. А. Метелкин // Новые огнеупоры. – 2006. – № 4. – С. 64 – 65.

107. Метелкин, А. А. Исследование влияния технологических факторов вакуумирования и качества периклазохромитовых огнеупоров на их износоустойчивость в футеровке вакуум – камер [Текст] / А. А. Метелкин // Технологии и оборудование для производства огнеупоров. Использование новых видов огнеупорных изделий в металлургической промышленности : материалы междунар. конф. – М.: Теплоэнергетик, 2006. – С. 121.

108. Veruto, D; Barco, L; Belleri, G On the stability of refractory materials under industrial vacuum conditions: Al_2O_3 , BeO, CaO, Cr_2O_3 , MgO, SiO_2 , TiO_2 systems // Ceramurgia international. – September. 1975 – Vol.1. Iss. 2. –P.87-93

109. Виноградов, С. В. Развитие вакуумирования стали в ОАО НТМК [Текст] / С. В. Виноградов, М. А. Третьяков, А. А. Фетисов // Сталь. – 2007. – №12. – С. 13 – 14.

110. Соколов, А. Н. Массы для полусухого горячего ремонта футеровки патрубков циркуляционного вакууматора [Текст] / А. Н. Соколов, О. В. Квятковский, А. Б. Сибикин, Е. С. Борисовский, С. З. Ципорина, Л. Я. Осипова, В. В. Рябов, В. В. Чуйков, А. М. Скуридин, А. К. Мартыненко // Огнеупоры. – 1991. – №6. – С. 29 – 31.

111. Метелкин, А. А. Оценка влияния агрессивности технологических факторов на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий, применяемых в футеровке сталеразливочного ковша [Текст] / А. А. Метелкин, О. Ю. Шешуков, В. В. Левчук, С. П. Малинин, И. В. Некрасов // Сталь. – 2013. – №5. С. 29 – 30.

112. Кокаренко, О. Н. Опыт применения газодинамической отсечки конвертерного шлака [Текст] / О. Н. Кокаренко, Ю. А. Дерябин, Ю. С. Щекалев // Выплавка и передел природнолегированных чугунов : Темат. Отрасл. сб. – Свердловск: УралНИИчермет. – 1990. – С. 37 – 44.

113. Лазарев, А. И. Анализ металлов [Текст] : справ. изд. / А. И. Лазарев, И. П. Харламов. – М. : Металлургия, 1987. – 320 с.

114. Смирнов, Л. А. Конвертерный передел ванадиевого чугуна [Текст] / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, С. К. Носов, А. Я. Кузовков, В. И. Ильин. – Екатеринбург : Средний Урал кн. изд. – 2000. – 528 с.

115. Аршанский, М. И. Новый 160-т конвертер – в строю [Текст] / М. И. Аршанский, Ю. А. Данилин, С. В. Виноградов // Сталь. – №6. – С. 20 – 22.

116. Еронько, С. П. Исследование процесса отсечки шлака при выпуске стали из кислородного конвертера на физических моделях [Текст] / С. П. Еронько, С. А. Бедарев, С. В. Мечик // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. – №7. – С. 7 – 12.

117. Общая теория статистики [Текст]: учеб. пособие / под ред. Р.А. Шмойловой. – Изд. 3-е, перераб. – М. : Финансы и Статистика. – 2002. – 560 с.

118. Елисеева, И. И. Общая теория статистики [Текст]: учеб. пособие / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Финансы и Статистика. – 2002. – 480 с.

119. Шторм, Р. Теория вероятностей, математическая статистика, статистический контроль качества [Текст] / под ред. Н.С. Райбмана. – Изд. «МИР». – М.: 1970. – 368 с.

120. Мухранов, Н. В. Отработка технологии применения карбида кальция для раскисления стали в конвертерном цехе НТМ [Текст] / Н. В. Мухранов, С. А. Ремиго, И. В. Костенко, В. В. Левчук, Ф. Хервиг // Сталь. – 2008. – №6. – С. 26 – 28.

121. Носов, Ю. Н. Особенности десульфурации на АКП низкокремнистой, раскисленной алюминием конвертерной стали [Текст] / Ю. Н. Носов, А. А. Михайлев, Ю. В. Школа // Сталь. – 2009. – №2. – С. 17 – 20.

122. Гиндулин, М. Т. Применение алюмошлаковых брикетов при внепечной обработке стали на Ашинском металлургическом заводе [Текст] / М. Т. Гиндулин, С. В. Федотов, З. Х. Шакиров, В. И. Гернер, В. В. Обрезков, А. В. Сенин // Сталь. – 2011. – №8. – С. 28 – 30.

123. Есин, О. А. Электролитическая природа расплавленных шлаков [Текст] / О.А. Есин – Свердловск: Уральский индустриальный институт, 1946. – 41 с.

124. Смирнов, Л. А. Разработка составов силикатных шлаковых расплавов для непрерывной разливки стали [Текст] / Л. А. Смирнов, А. А. Смирнов, В. А. Старцев, Е. Н. Балахонов – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 120 с.

125. Новиков, В. К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов [Текст] / В. К. Новиков // Расплавы. – 1987. – № 6. – С. 21 – 33.

126. Новиков, В. К. Применение полимерной модели к расчету вязкости оксидных расплавов [Текст] / В. К. Новиков, В. Н. Невидимов // Известия Высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1999. – №11. – С. 9 – 12.

127. Lasse Forsbacka. Doctoral Thesis. «EXPERIMENTAL STUDY AND MODELLING OF VISCOSITY OF CHROMIUM CONTAINING SLAGS». Helsinki University of Technology Publications in Materials Science and Engineering Teknillisen korkeakoulun materiaalitekniikan julkaisuja. – Espoo 2007. – ТКК-МТ-196.

128. Некрасов, И. В. Разработка рационального режима плавки стального полупродукта в сверхмощных дуговых электропечах [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 : защищена 05.03.10 : утв. 11.06.10 / Некрасов Илья Владимирович. – Екатеринбург. – 2012. – 145 с.

129. Шешуков, О. Ю. Исследование оптимального содержания оксида магния в шлаке с целью увеличения стойкости футеровки металлургических агрегатов на участке внепечной обработки стали КЦ ЕВРАЗ НТМК [Текст] / О. Ю. Шешуков, А. А. Метелкин, И. В. Некрасов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : материалы 71-й межрегиональной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Издательство МГТУ: – 2013. – Т.1. С. 138 – 141.

130. Шешуков, О. Ю. Рациональное наведение шлака для повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей в условиях конвертерного цеха ЕВРАЗ НТМК [Текст] / О. Ю. Шешуков, В. В. Левчук, С. П. Малинин, А. А. Метелкин, И. В. Некрасов // Актуальные проблемы современной науки, тех-

ники и образования: материалы 70-й межрегиональной научно-технической конференции. – Магнитогорск : Издательство МГТУ. – 2012. – Т.1. С. 186 – 189.

131. Некрасов, И. В. Оценка вязкости гетерогенных оксидных расплавов [Текст] / И.В. Некрасов // Молодой ученый. – 2012. – №12. – С. 95 – 98.

132. Воскобойников, В. Г. Свойства жидких доменных шлаков [Текст] / В. Г. Воскобойников, Н. Е. Дунаев, А. Г. Михалевич, Т. И. Кухтин, С. В. Штенгельмейер – М. : Metallurgia, 1975. – 184 с.

133. Попель, С. И. Теория металлургических процессов [Текст]: учеб. пособие для ВУЗов / С. И. Попель, А. И. Сотников, В. Н. Бороненков – М. : Metallurgia, 1986. – 463 с.

134. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я. И. Френкель - Л. : Наука, 1975. – 487 с.

135. Wright, S. Viscosity of a CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ Melt Containing Spinel Particles at 1646 K / S. Wright, L. Zhang, S. Sun, S. Jahanshahi // Metallurgical and Materials Transactions. – 2000. – Vol. 31B. – P. 97 – 104.

136. Айзатулов Р.С Теоретические основы сталеплавильных процессов: Учебное пособие для вузов / . Р.С. Айзатулов, П.С. Харлашин, Е.В. Протопопов, Л.Ю. Назюта. – М: МИСИС. – 2002. – 320 с.

137. Мачикин В.И. Повышение качества черных металлов / В.И. Мачикин, А.М. Зборщик, Е.Н. Складановский. – Киев: Техника. – 1981. – 161 с.

138. Аграчёва Р.А. Основы теории металлургических процессов / Р.А. Аграчёва, И.П. Гофман – М.: Metallurgia. – 1965. – 274 с.

139. Ito K. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part II. Dimensional analysis and foaming in iron and steelmaking processes / K. Ito, R.J. Fruehan // Metallurgical transactions B. – 1989. – Vol. – 20B. – Pp. – 515 – 521.

140. Fruehan R.J. Slag foaming in bath smelting // Metallurgical transactions B. – 1991. – Vol. – 22B. – Pp. – 481 – 489.

141. Ito K. Study on the foaming of CaO-SiO₂-FeO slags: Part I. Foaming parameters and experimental results / K. Ito, R.J. Fruehan // Metallurgical transactions B. – 1989. – Vol. – 20B. – Pp. – 509 – 514.

142. Wright S. Viscosity of a CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ Melt Containing Spinel Particles at 1646 K/ S. Wright, L. Zhang, S. Sun, S. Jahanshahi // Metallurgical and Materials Transactions. – 2000. – Vol. – 31B. – Pp. – 97 – 104.

143. Некрасов И.В. Прогнозирование вязкости гетерогенных шлаков/ И.В. Некрасов, В.Н. Невидимов, О.Ю. Шешуков // Структура и свойства металлических и шлаковых расплавов: Тр. XII Российской конференции. – Т1. – Моделирование и расчёт структуры и свойств неупорядоченных систем в конденсированном состоянии. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2008. – С. – 123 – 126.

144. Некрасов И.В. Прогнозирование вязкости гетерогенных шлаков по ходу плавки / И.В. Некрасов // Перспективные материалы, Специальный выпуск (5): Материалы V российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов. – 11-13 ноября 2008. – под. ред. академика РАН Ю.В. Цветкова и др. – ноябрь 2008. – С. – 217 – 220.

145. Ito K. Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags. / K. Ito, R.J. Fruehan // Metallurgical transactions. – 1989. – Vol. – 20B. – Hh – 515 – 521.

146. Wright S. Viscosity of a CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ melt containing spinel particles at 1646 K° / S. Wright, L. Zhang, S. Sun, S. Jahanshahi // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – Vol. – 31. – № 1. – pp. – 97 – 104.

147. Kondratiev A. Prediction of slag viscosities in metallurgical systems / A.Kondratiev, E.Jak, P.C.Hayes // JOM. – 2002. – Vol. – 54 – №11. – pp. – 41 – 45.

148. Kondratiev A. Slak viscosity prediction and characterization Al₂O₃-CaO-FeO-SiO₂ and Al₂O₃-CaO-FeO-MgO-SiO₂ systems / A. Kondratiev, E. Jak, P.C. Hayes // Research report 58. – The University of Queensland. – February 2006.

149. Glasstone S. Theory of the rate processes / S. Glasstone, K.J. Laidler, H. Eyring // McGraw-Hill. – New York. – 1941. – pp. – 611.

150. Kondratiev A. Quasi-chemical viscosity model for fully liquid slags in the Al₂O₃-CaO-‘FeO’-SiO₂ system / A. Kondratiev, E. Jak // VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2004.

151. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / Стрелов К.К. – М.: Металлургия. – 1985. – 480 с.

152. Способ переработки ванадий содержащих чугунов / А.А. Киричков В.А. Козлов, А.В. Кушнарев, В.М. Кулик, В.В. Петренев, А.Б. Юрьев // Патент № 2371483. – 2006.

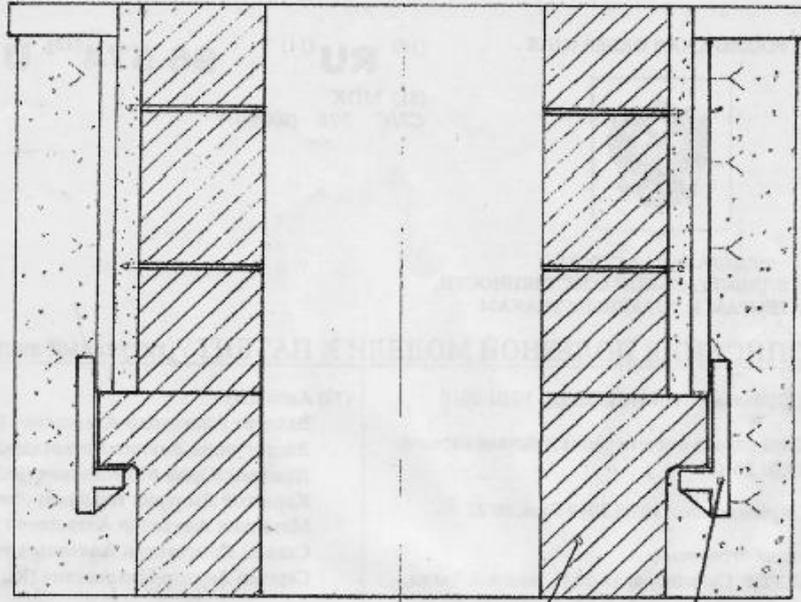
153. Развитие методов выпечной обработки стали за рубежом / Т.В. Носкова; Центр. науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-экон. исслед. чер. металлургии. – М.: Черметинформация, 1979. – 42 с.: ил.; 20 см. – (Черная металлургия: Обзор информ.). – Библиогр.: с. – 284 – 290.

Приложение А

(обязательное)

Полезная модель к патенту №2010101558/22. «Патрубок погружной для вакууматора»

| | | |
|---|---|--|
| РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ | | (19) RU (11) 96 574 (13) U1 |
|  | | (51) МПК C21C 7/10 (2006.01) |
| ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ, ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ | | |
| (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ (титульный лист) | | |
| <p>(21), (22) Заявка: 2010101558/22, 19.01.2010</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 19.01.2010</p> <p>(45) Опубликовано: 10.08.2010 Бюл. № 22</p> <p>Адрес для переписки: 622025, Свердловская обл., Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1, НТМК, ОРИП, Ю.Д. Исупову</p> | <p>(72) Автор(ы): Вайлерт Александр Алексеевич (RU), Вислогузова Эмилия Александровна (RU), Данилин Юрий Анатольевич (RU), Корюков Дмитрий Владимирович (RU), Метёлкин Анатолий Алексеевич (RU), Савкин Константин Анатольевич (RU), Сергеев Виктор Николаевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Открытое акционерное общество "Нижнетагильский металлургический комбинат" (ОАО "НТМК") (RU)</p> | RU 96574 U1 |
| (54) ПАТРУБОК ПОГРУЖНОЙ ДЛЯ ВАКУУМАТОРА | | |
| (57) Формула полезной модели | | |
| <p>Патрубок погружной для вакууматора, состоящий из металлической конструкции, футерованной огнеупорными кольцами, отличающийся тем, что нижнее огнеупорное кольцо имеет Г-образный в сечении профиль, а металлическая конструкция оснащена фиксирующим упором.</p> | | |
| Стр.: 1 | | |



1 / 2

RU 96574 U1

Приложение Б

(обязательное)

Заключение по использованию импортных периклазохромитовых огнеупоров в футеровке вакуум – камер

ЕВРАЗХОЛДИНГ
Нижнетагильский металлургический комбинат

Открытое акционерное общество
"Нижнетагильский металлургический комбинат"

Центральная лаборатория комбината

06.10.2005 № 184-121-2254

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
А.В. Амелин

[Подпись]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
по использованию импортных периклазохромитовых
огнеупоров в футеровке вакуум – камер.

Цель испытаний:
Оценить стойкость импортных периклазохромитовых
огнеупоров разных фирм – поставщиков и предложенные ими
схемы футеровок вакуум – камеры.

С января по сентябрь 2005г. в рабочей футеровке
нижней части вакуум – камеры были испытаны
периклазохромитовые огнеупоры фирм «Dufesco» и
«Magnesitwerk Aken». За этот период было проведено 7
кампаний с использованием футеровок фирмы «Dufesco»
и 26 – «Magnesitwerk Aken».

Футеровка вакуум – камер производилась согласно
технологической инструкции № 120-СТ.К-96-2005 «Футеровка,
сушка и разогрев вакуум-камеры, газохода и защитного
поддона сталевова вакууматора». Отличие проекта «Dufesco» от
«Magnesitwerk Aken» заключалось в схеме футеровке подины,
где использовалось усиление сектора верхнего огнеупорного
кольца впускного патрубка в районе перемычки (рис.1).

Фактические физико – химические показатели опытных
огнеупоров двух фирм представлены в таблице 1.

224

Средние технологические параметры эксплуатации вакуум – камер приведены в таблице 2.

Таблица 1.

| Поставщик | Физико – химические показатели. | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------------------|--------------------|--|
| | MgO | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Плотность, г/см ³ | Каж. пористость, % | Предел прочности при сжатии, Н/мм ² |
| Magnesitwerk Aken | 57,77 | 20,85 | 13,03 | 7,40 | 0,57 | 0,38 | 3,226 | 16,2 | 45,2 |
| Duferco | 66,19 | 21,53 | 6,74 | 2,98 | 0,81 | 0,88 | 3,34 | 11,4 | 108,8 |

Из таблицы 2 видно, что условия работы вакуум – камер разных фирм – поставщиков не имели принципиального различия и поэтому сравнение удельного износа периклазохромитовых огнеупоров объективно.

Средняя стойкость футеровки по лимитирующему впускному патрубку составила: у фирмы «Duferco» – 100,6 плавов, у фирмы «Magnesitwerk Aken» – 88,2 плавки.

После службы производили оценку состояния футеровки. Максимальный износ был отмечен во впускном патрубке в районе аргонных колец. Данные по остаточной толщине и удельному износу огнеупоров фирм «Duferco» и «Magnesitwerk Aken» представлены в таблице 3. Удельный износ огнеупоров впускного патрубка составил: верхнее огнеупорное кольцо – у фирмы «Duferco» – 1,2, у «Magnesitwerk Aken» – 1,7 мм/пл; средняя часть (третье кольцо) – у фирмы «Duferco» – 1,0, у «Magnesitwerk Aken» – 1,7 мм/пл; район аргонных сопел – у фирмы «Duferco» – 1,4, у «Magnesitwerk Aken» – 1,9 мм/пл.

Схема футеровки фирмы «Duferco» с усилением в районе переменычки позволила исключить вымывание верхнего кольца впускного патрубка и увеличить ресурс работы вакуум – камеры. При футеровке подины трудностей с установкой огнеупорного кольца нового формата не возникало.

Таблица 2.

| Фирма | Средние технологические параметры. | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|------------------|------|--------------------------------|------------------------|---------|-----------|---------|----------------------------|-------------------------|
| | Остаточное давление, % | | | | | | Химический состав шлака, % | | | | | Обработанный металл, % | | | | Время вакуумирования, мин. | Кол. торкретировок, шт. |
| | <2 | <3 | >3 | >4 | >5 | >6 | MgO | FeO | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Транс-портный | Трубный | Хромистый | Марки Ю | | |
| Duferco | 68,4 | 13,2 | 2,9 | 1,5 | 0,5 | 9,0 | 7,80 | 1,5 | 19,8 | 54,9 | 10,6 | 70,6 | 9,6 | 14,1 | - | 1545 | 30,5 |
| MWA | 67,4 | 16,5 | 5,1 | 2,1 | 0,3 | 3,2 | 7,40 | 1,5 | 21,7 | 54,2 | 10,3 | 57 | 10,6 | 906 | 2,5 | 1355 | 27,8 |

Таблица 3.

| | Начальная толщина футеровки, мм. | Остаточная толщина футеровки, мм. | | | Удельный износ, мм/пл. | |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|---------|-----|------------------------|-----|
| | | | Duferco | MWA | Duferco | MWA |
| Впускной | 180 | верх | 107 | 84 | 1,2 | 1,7 |
| | | середина | 76 | 36 | 1,0 | 1,7 |
| | | низ | 39 | 14 | 1,4 | 1,9 |
| Сливной | 180 | верх | 136 | 124 | 0,7 | 0,9 |
| | | середина | 91 | 101 | 0,7 | 0,6 |
| | | низ | 72 | 80 | 0,8 | 0,8 |
| Стены | 250 | над впускным | 136 | 152 | 1,0 | 0,9 |
| | | над сливным | 191 | 184 | 0,4 | 0,4 |

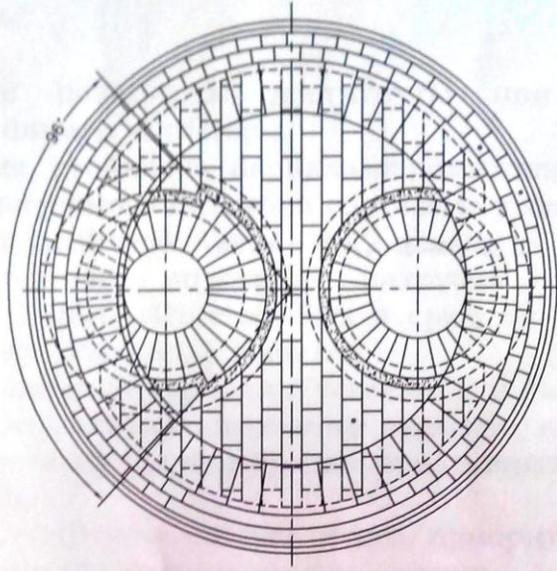


Рис. 1. Схема футеровки фирмы "Dufenco"
с усилением в районе перемычки.

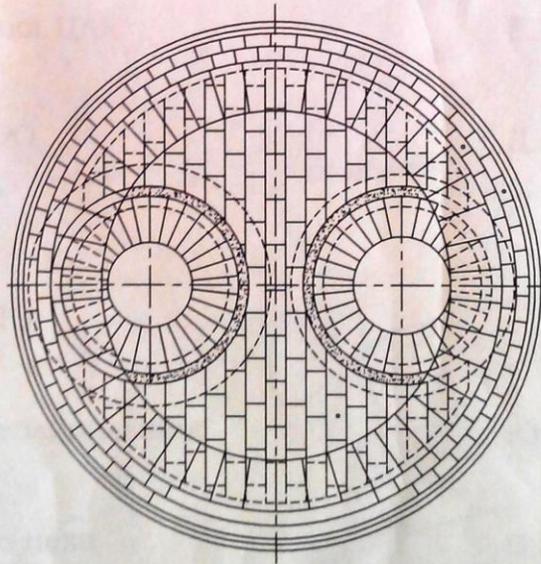
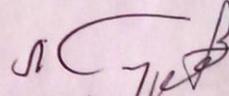


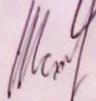
Рис. 2. Схема футеровки фирмы "Magnesitwerk Aken"
без усиления в районе перемычки.

Выводы:

1. Лучшие результаты достигнуты при использовании огнеупоров фирмы «Dufergo».
2. Средняя стойкость периклазохромитовых огнеупоров в футеровке впускного патрубка составила у фирмы «Dufergo» – 100,6, у «Magnesitwerk Aken» – 88,2 плавки.
3. В футеровке впускного патрубка удельный износ огнеупоров фирмы «Dufergo» был в среднем меньшим, чем у «Magnesitwerk Aken» на 0,5 мм/пл.
4. Новая схема футеровки с усилением в районе перемычки позволила исключить вымывание верхнего кольца впускного патрубка, поэтому целесообразно продолжить её дальнейшее использование.
5. Фирме «Дуферко» следует отдать приоритет при поставке огнеупоров для футеровки вакуум – камер.

Начальник
технического управления





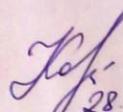
 28.09.05

А.А. Киричков

И.о. начальника ЦЛК

Е.В. Шеховцов

Начальник ЛЭО



 28.09.2005

Д.В. Корюков

СОГЛАСОВАНО:

Главный сталеплавильщик



Ю.А. Данилин

Начальник
конвертерного цеха



В.М. Кулик

ЦЛК: Метелкин, 49-09-96



Приложение В
(обязательное)

Заключение по использованию импортных периклазохромитовых огнеупоров
фирмы «КРОК» в футеровке вакуум – камер

ЕВРАЗХОЛДИНГ
Нижнетагильский металлургический комбинат

Открытое акционерное общество
"Нижнетагильский металлургический комбинат"

Центральная лаборатория комбината

12.01.07 № 184-85-39

Утверждаю
Главный инженер
А.Б. Юрьев

[Подпись]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
по использованию импортных периклазохромитовых огнеупоров
фирмы «КРОК» в футеровке вакуум – камер.

Цель испытаний:
Оценить стойкость импортных периклазохромитовых огнеупоров фирмы «КРОК» в сравнении с серийно применяемыми изделиями фирмы «Дуферко».

С августа по ноябрь 2006г. в рабочей футеровке нижней части вакуум – камеры были испытаны периклазохромитовые огнеупоры фирмы «КРОК» (Китай). За этот период было проведено 4 кампании с использованием опытных огнеупоров.

Футеровка вакуум – камер производилась согласно технологической инструкции № 120-СТ.К-96-2005 «Футеровка, сушка и разогрев вакуум-камеры, газохода и защитного поддона сталевоза вакууматора». При проведении огнеупорных работ замечаний к изделиям фирмы «КРОК» не было.

Фактические физико – химические показатели огнеупоров фирмы «КРОК» в сравнении с серийно используемыми изделиями «Дуферко» представлены в табл. 1.

Средняя стойкость рабочей футеровки по патрубкам у огнеупоров фирмы «КРОК» составила 116,0 плавков, у серийных изделий фирмы «Дуферко» – 119,3 плавки.

Таблица 1.

Качественные показатели изделий для футеровки вакуум – камер.

| Поставщик | Физико – химические показатели. | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------------------|--------------------|--|
| | Массовая доля, % | | | | | | Плотность, г/см ³ | Каж. пористость, % | Предел прочности при сжатии, Н/мм ² |
| | MgO | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | | | |
| КРОК | 64,34 | 21,38 | 6,56 | 4,10 | 0,62 | 0,74 | 3,32 | 11,3 | 107,0 |
| Дуферко | 65,28 | 21,46 | 6,78 | 3,09 | 0,84 | 0,87 | 3,34 | 11,3 | 113,0 |

После службы производили оценку состояния футеровки. Максимальный износ был отмечен, как обычно, во впускном патрубке в районе аргонных колец. Три из четырех опытных вакуум – камер были выведены из работы по регламенту, одна – по прогару сливного патрубка (117 плавов), обусловленному проходом металла между 2 и 3-м огнеупорными кольцами. Возможной причиной прогара послужило проседание 2-х нижних колец из-за износа торцевой части патрубка и поддерживающей полочки. Все вакуум – камеры, футерованные изделиями фирмы «Дуферко», выведены из эксплуатации без прогара брони.

Средние технологические параметры эксплуатации вакуум – камер приведены в таблице 2.

Из табл. 2 видно, что условия работы вакуум – камер разных фирм – поставщиков не имели принципиального различия и поэтому сравнение удельного износа периклазохромитовых огнеупоров объективно.

Данные по остаточной толщине и удельному износу огнеупоров фирм «КРОК» и «Дуферко» представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что удельный износ опытных и серийно применяемых огнеупорных изделий во впускном патрубке равнозначен. В сливном патрубке удельный износ у серийных изделий меньше, чем у опытных на 0,1 мм/пл. Стойкость периклазохромитовых изделий рабочей футеровки стен в нижней части вакуум – камер у обеих фирм равнозначна.

Средние удельные затраты по огнеупорам для патрубков и нижней части стен вакуум – камер, с учетом затрат на торкрет – массу для патрубков, составили: для изделий фирмы «КРОК» – 55,56 руб/т, для изделий фирмы «Дуферко» – 49,29 руб/т.

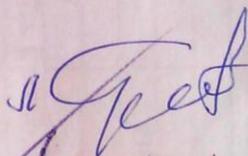
Выводы:

1. Качественные показатели изделий фирмы «КРОК» практически не уступают качественным показателям изделий фирмы «Дуферко».
2. Средняя стойкость футеровки по впускному патрубку составила: у фирмы «КРОК» – 116,0 плавков, у фирмы «Дуферко» – 119,3 плавки.
3. Удельный износ огнеупоров в футеровке лимитирующего впускного патрубка у фирм «Дуферко» и «КРОК» равнозначен.
4. Удельные затраты по огнеупорам для патрубков и стен нижней части вакуум – камеры составили: для изделий фирмы «КРОК» – 55,56 руб/т, для изделий фирмы «Дуферко» – 49,29 руб/т.

Предложения:

1. Огнеупоры фирмы «КРОК» для нижней части вакуум – камеры можно рекомендовать к серийному использованию.
2. Рассмотреть на комиссии по закупу на II и III кв. фирму «КРОК», как второго поставщика огнеупоров для вакууматора при условии сопоставимости удельных затрат с первым поставщиком фирмой «Дуферко».

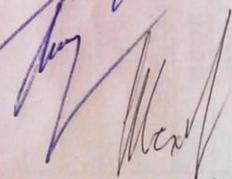
Начальник
технического управления

 А.А. Киричков

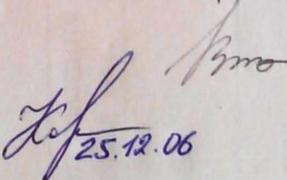
Начальник ЦЛК

Ю.П. Петренко

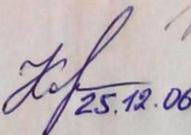
Заместитель начальника ЦЛК
по науке и НИР

 Е. В. Шеховцов

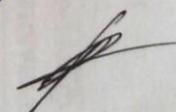
Ведущий специалист
по огнеупорам

 Э.А. Вислогузова

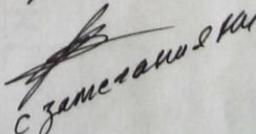
Начальник ЛЭО

 25.12.06 Д.В. Корюков

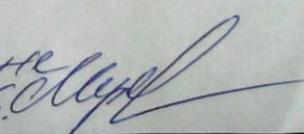
СОГЛАСОВАНО:
Главный сталеплавильщик

 Ю.А. Данилин

Начальник
конвертерного цеха

 с замечаниями В.М. Кулик

ЦЛК: Метелкин, 49-09-96

По ур. в ком. проф. ком. не
составлен. 27.12.06. 

Приложение Г
(обязательное)

Акт по испытаниям футеровки днища вакууматора №1 фирмы «DUFERCO»



УТВЕРЖДАЮ
И.о. главного инженера ОАО «ММК»
Г.В. Щуров
Г.В. Щуров
« 22 » 09 2012 2012 г.

по испытаниям футеровки
днища вакууматора №1 фирмы
«DUFERCO»

В соответствии с программой испытаний огнеупорных материалов в ККЦ на участке внепечной обработки были проведены испытания двух комплектов футеровок, предназначенных для днища вакууматора №1, поставленных фирмой «DUFERCO»,

Качественные показатели огнеупорных материалов, использованных при выполнении футеровки днища, приведены в таблице 1.

Таблица 1- физико-химические показатели огнеупорных материалов

| марка | тип | Химический состав, % | | | | | | Плотность, гр/см ³ | Зерновой состав, мм | Предел прочности при сжатии, МПа |
|-----------------|----------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--|
| | | MgO | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | | | |
| DSA-FR65MCI | кирпич | >58,0 | >19,0 | <9,5 | <2,0 | <2,0 | <7,0 | >3,05 | | >60,0 |
| DSA-SR16VI | кирпич | >55,0 | >13,0 | <10,5 | <3,0 | <3,0 | <9,0 | >3,05 | | >35,0 |
| DSA-NI0SFY | кирпич | >56,0 | >8,0 | <18,0 | <4,0 | <5,5 | <7,5 | >2,7 | | >40,0 |
| DSA-ALSITHERM95 | теплоизоляция | - | - | 4,0 | - | >90,0 | | <1,2 | | - |
| DSA-MCRAM57RH | набивная масса | >52,0 | >15,0 | <16,0 | - | <3,0 | <10,0 | >2,5 | 0-4 | >15,0 |
| DSA-MCMOR55RH | мертель | >50,0 | >17 | <14 | - | <2,5 | <8,0 | - | | - |
| DSA-ACAST90RH | бетонная смесь | <8,0 | - | <2,0 | <3,0 | <2,5 | >85,0 | >2,6 | 0-12 | >25,0 |
| DSA-MG85RH | торкрет масса | >79,0 | - | <3,0 | <6,0 | <10,0 | <4,0 | >1,8 | 0-3 | - |

Выполнение футеровки днищ вакууматора № 1 производилось в соответствии с проектом № ММК – 516В.

Изделия для футеровки патрубков марки DSA-FR65MCI (форматов MSI-1 – MSI7) были поставлены в свободном сборе с предварительным стендированием на заводе-изготовителе. Футеровка в патрубках была выполнена кольцевой кладкой. Замечаний к качеству изделий и сборки патрубков не отмечено.

Подина была выполнена в соответствии с проектом, чертежами и рекомендациями проекта. Для выравнивания сферической формы металлоконструкции до горизонтального уровня была использована набивная масса DSA-MCRAM57RH. Толщина набивной массы составила 60 мм в зоне перемычки. Арматурная футеровка, состоящая из 2-х слоёв, была выполнена изделиями марки DSA-FR65MCI формата 30/0. Общая толщина арматурного

слоя составила 200мм. Рабочая футеровка подины была выполнена изделиями марки DSA-FR65MCI толщиной 350 мм. «паркетной» кладкой. Зазоры вокруг сливных колец патрубков и по окружности под стенами были заполнены набивной массой марки DSA-MCRAM57RH.

После выполнения футеровок замечаний к качеству кладки выявлено не было. Разогрев футеровок на обеих кампаниях был произведён в соответствии с графиком, предоставленным ЦЭСТ. Длительность разогрева составила 48 часов.

Таблица 1 - анализ эксплуатации вакууматора №1 при проведении испытаний футеровок фирмы «DUFERCO».

| Показатели сравнения | Комплект 1 | Комплект 2 |
|--|------------|------------|
| Стойкость, пл. | 97 | 201 |
| Длительность кампании, мин | 1110 | 1880 |
| Среднее время обработки плавки | 11,4 | 9,4 |
| Фактическая доля эксплуатации (от календарной длительности), % | 4,8 | 4,2 |
| Интенсивность эксплуатации, пл/сут | 6,1 | 6,5 |
| Распределение интенсивности, % | | |
| в т.ч., более 10 пл/сут | 12,5 | 6,5 |
| 10-6 пл/сут | 31,3 | 61,3 |
| менее 6 пл/сут | 56,2 | 32,2 |

Интенсивность эксплуатации вакууматора №1 в период проведения испытаний первого комплекта в июне (с 4 по 19 июня) составила 6,1 пл./сут., второго комплекта – в ноябре (с 26 октября по 25 ноября) 2011 года составила 6,5 пл./сутки.

Максимальное суточное производство при испытании первого комплекта составило 13,5 плавов (8-9 июня), минимальное – 2 плавки (6 и 16 июня). В соответствии с производственным заказом интенсивность эксплуатации оценивается как неудовлетворительная. Суммарное время вакуумирования металла за кампанию составило 1110 минут со средней длительностью обработки плавки – 11,44 минуты. Фактическое время эксплуатации вакууматора №1 составило 4,8 % от общего времени длительности кампании. 95,2 % длительности кампании – это простой вакууматора в межплавочные периоды. Основной сортамент обработанного металла на кампании был представлен низкоуглеродистыми марками типа 08ПС, 08Ю, SAE 1006 – 54% плавов, со средним временем вакуумирования 8,1 минуты. 6,0 % плавов обрабатывались в течение 31 минуты (if-сталь, К-65). Длительность вакуумирования остальных 40 % плавов (09Г2С и др.) в среднем составила 13 минут.

При проведении испытаний второго комплекта эксплуатация вакууматора с интенсивностью свыше 10 плавов производилась 2 суток. В течение 19 суток интенсивность эксплуатации агрегата в среднем составляла 8,9 плавки. Интенсивность эксплуатации от 3 до 5 плавов в сутки отмечена в течение 10 суток. Суммарное время эксплуатации вакууматора №1 при проведении испытаний второго комплекта футеровки днища, поставленного фирмой «DUFERCO», составило 1880 минут, что в среднем ниже, чем при первом

испытании, при оценке длительности обработки одной плавки на 18,2 % (9,4 против 11,4 минуты).

На первой кампании отмечено образование горизонтального разгара под сливными кольцами в обоих патрубках после достижения стойкости 20 плавков, что явилось следствием неритмичной эксплуатации агрегата в течение первых 4-х суток кампании. В дальнейшем, произошло увеличение разгара до критического состояния (стойкость 82 плавки), после чего эту зону начали восстанавливать нанесением керамической наплавки. На стойкости 97 плавков, во время обработки плавки произошёл сквозной прогар днища в зоне всасывающего патрубка. Из-за невозможности провести восстановительный ремонт зоны прогара (рис. 5) кампания была прекращена.

Состояние футеровки в патрубках в течение второй кампании оценивалось как удовлетворительное. За счёт постоянного принудительного подогрева футеровки патрубков в межплавочные периоды образование термических сколов рабочей поверхности практически не отмечено. Уход за футеровкой осуществлялся за счёт использования нейтрализатора шлака, проведения очистки наружной футеровки от настывшей, подливки патрубков снизу для предотвращения разрушения нижних колец и торкретирования наружной футеровки. Керамическая наплавка и последующее торкретирование внутренней футеровки были выполнены после достижения стойкости свыше 150 плавков, в зоне под сливными (верхними) кольцами в обоих патрубках. В дальнейшем, эту операцию повторяли через каждые 10 плавков до конца кампании.

При достижении футеровки 201 плавка кампания была прекращена по причине образования сквозного прогара днища. Образование прогара отмечено в зоне под сливным кольцом во всасывающем патрубке по перемычке. Дальнейшая эксплуатация вакууматора признана нецелесообразной.

Проведённый визуальный осмотр опытных футеровок фирмы «DUFERCO» после эксплуатации выявил следующее:

- общий вид футеровки днища оценивается как удовлетворительный (97 плавков) (рис.1, 2)



Рисунок 1- вид футеровки подины

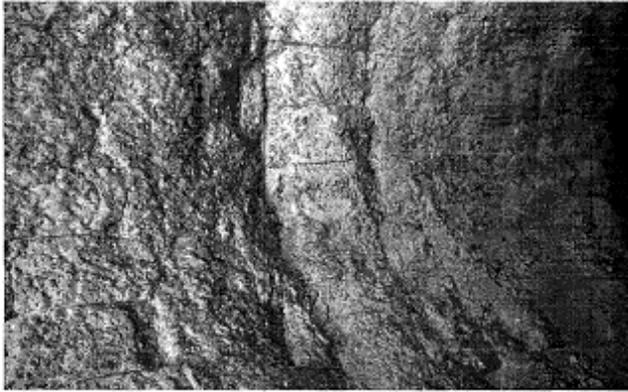


Рисунок 2- вид всасывающего патрубка (97 плавков)

- остаточная толщина футеровки во всасывающем патрубке составила 160 мм (0,93 мм/пл) (рис. 3)

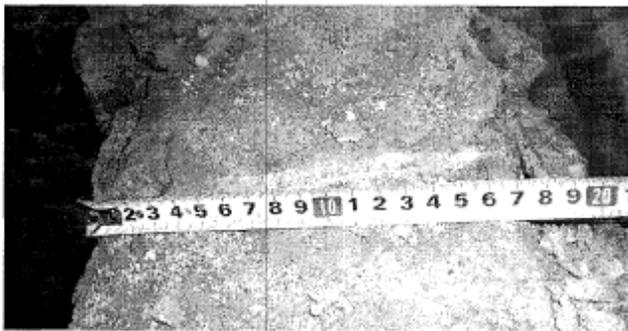


Рисунок 3 – остаточная толщина футеровки во всасывающем патрубке (97 плавков)

- остаточная толщина футеровки в сливном патрубке – 190 мм или 0,62 мм/пл. (рис.4)



Рисунок 4 - остаточная толщина футеровки в сливном патрубке (97 плавков)

- местоположение прогара в металлоконструкции и в футеровке (рис.5 и 6) указывает на сквозное проникновение металла из-за образования локального разгара под сливным кольцом

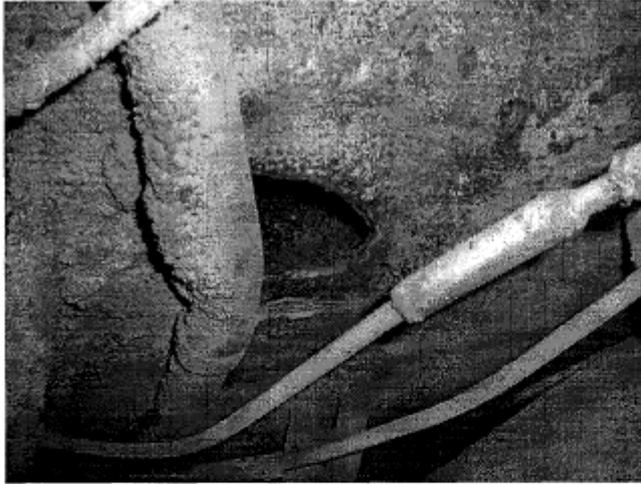


Рисунок 5 – всасывающий патрубок, прогар металлоконструкции

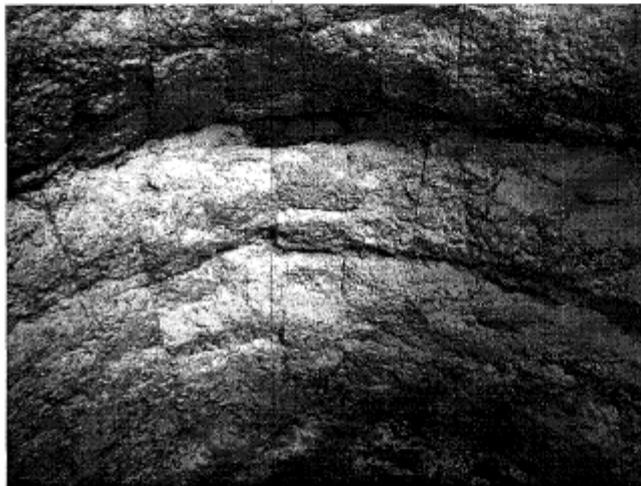


Рисунок 6 – всасывающий патрубок, сквозное разрушение футеровки

Выводы и рекомендации:

1. В 2011 г., в условиях ККЦ ОАО «ММК» были проведены испытания двух опытных футеровок для днища вакууматора №1, поставленных фирмой «DUFERCO». Гарантированный показатель стойкости 200 плавков достигнут только на одной кампании. Стойкость опытных футеровок составила 97 и 201 плавки. Обе кампании были прекращены по причине сквозного прогара под сливным кольцом во всасывающем патрубке.

2. Анализ технологических параметров эксплуатации кампаний не выявил нарушений при эксплуатации. Отмечена невысокая интенсивность эксплуатации агрегата - 6,1 пл/сут на первой кампании, 6,5 пл/сут на второй кампании. Среднее время обработки одной плавки на первой кампании составило 11,4 минуты, на второй – 9,4 минуты.

4. При эксплуатации футеровка производства фирмы «DUFERCO» показала нестабильность при эксплуатации. Необходимость проведения восстановительного ремонта футеровки в патрубках на первой кампании возникла после достижения стойкости 80 плавков. К восстановлению футеровки

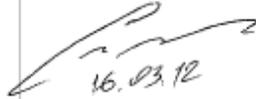
на второй кампании приступили после 150 плавки (74,6 % длительности кампании). Уход за футеровкой осуществлялся в соответствии с состоянием футеровки.

5. При визуальном осмотре футеровки после эксплуатации её состояние признано удовлетворительным. Сквозные прогары образовались в результате образования термических сколов в кладке.

6. Для определения целесообразности серийного использования футеровок фирмы «DUFERCO» для днища вакууматора №1 целесообразно продолжить испытания.

Начальник ЦЛК

Начальник ККЦ

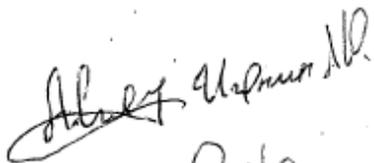


16.03.12

С.В. Денисов



Д.В. Рабаджи


С.К. Хорин

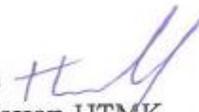
Приложение Д
(обязательное)

Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов при
внепечной обработке стали



Открытое акционерное общество
«Нижнетагильский металлургический комбинат»

22.10.04 № 184-49-2195

УТВЕРЖДАЮ 
Главный инженер НТМК
Н.Х.Мухатдинов

Заключение

по НИР «Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов при внепечной обработке стали».

Плавиновый шпат широко применяется в сталеплавильном производстве как эффективный разжижитель шлака. Однако применение плавинового шпата при внепечной обработке имеет ряд существенных недостатков: фторид кальция способствует разъеданию футеровки сталеразливочных ковшей и вакуум-камер, а также, в условиях высоких температур, происходит частичное испарение CaF_2 , приводящее к ухудшению экологической обстановки.

Известно, что оксид алюминия (Al_2O_3) образует с известью легкоплавкое соединение с температурой плавления 1395°C , вследствие чего происходит разжижение шлака. Оксид алюминия, в отличие от фторида кальция (CaF_2), способствует образованию на поверхности кладки шпинели ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), которая препятствует проникновению окислов кремния в поры огнеупора и последующему его растрескиванию.

В августе-октябре 2007 года, с целью определения технологической целесообразности использования в качестве разжижителя шлака при внепечной обработке стали проведено испытание глиноземсодержащего материала «РАНТАЛ 50ГР» производства ООО «Рантал».

Химический состав материала приведен в таблице 1.

Таблица 1.

| Материал | Массовая доля, % | | | | | | | | |
|---|------------------|-------------------------|----------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------|
| | ппп | Al_2O_3 | SiO_2 | CaO | MgO | Fe_2O_3 | Na_2O | K_2O | TiO_2 |
| РАНТАЛ 50ГР | 2,95 | 72,1 | 20,0 | 0,71 | 0,70 | 2,05 | 0,52 | 0,31 | 1,98 |
| РАНТАЛ 50ГР – пористый сыпучий материал, фракция 5-40 мм. | | | | | | | | | |

С использованием данного материала было проведено 93 опытные плавки. В качестве сравнительных проанализированы аналогичные марки стали, в которых для разжижения шлака применялся плавиковый шпат (167 плавки) и шамот (163 плавки).

Технологические параметры опытных и сравнительных плавков приведены в таблице 2

Таблица 2

| Ма-тери-ал | время обра-ботки, мин | содержание серы, % | | сте-пень де-сульфу-рации, % | расход материалов, кг/плавку | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|------|--------|----------|-----------|
| | | началь-ное | конеч-ное | | РАН-ТАЛ 50ГР | Шпат | Ша-мот | Из-весть | Всего ТШС |
| пла-вико-вый шпат | 39 | 0,0171 | 0,0122 | 27,4 | - | 234 | - | 864 | 1098 |
| ша-мот | 36 | 0,0163 | 0,0133 | 18,0 | - | - | 388 | 824 | 1212 |
| РАН-ТАЛ 50ГР | 40 | 0,0165 | 0,0120 | 25,7 | 202 | - | - | 946 | 1148 |

При вводе «РАНТАЛ 50ГР» в ковш газовыделения, барботажа и вспенивания шлака не происходило. В результате визуальной оценки шлака по ходу обработки установлено, что опытный материал обладает удовлетворительной разжижительной способностью. Однако необходимая жидкоподвижность шлака с применением шпата достигалась быстрее.

Из данных таблицы 2 видно, что при близких значениях технологических параметров (начальное содержание серы, время обработки, расход твёрдых шлакообразующих смесей) значения степени десульфурации при использовании плавикового шпата и материала «РАНТАЛ 50ГР» близки и составляют 27,4 % и 25,7 % соответственно; при использовании шамота степень десульфурации ниже – 18 %.

Для определения изменения содержания Al_2O_3 в шлаке производился отбор проб шлака до и после обработки на установках печь-ковш. Также отбирались пробы шлака на плавках с использованием плавикового шпата и шамота.

Изменение среднего химического состава шлака на опытных и сравнительных плавках показано в таблице 3.

Таблица 3

| Материал | шлаки | Химический состав шлака, % | | | | |
|-------------|-------|----------------------------|------------------|------|-----|--------------------------------|
| | | CaO | SiO ₂ | MgO | FeO | Al ₂ O ₃ |
| РАНТАЛ 50ГР | до | 39,0 | 23,1 | 9,3 | 3,6 | 12,8 |
| | после | 53,0 | 19,6 | 7,5 | 1,8 | 18,0 |
| Шпат | до | 36,9 | 29,2 | 7,9 | 2,9 | 8,6 |
| | после | 50,7 | 25,9 | 7,1 | 1,2 | 8,5 |
| Шамот | до | 28,8 | 25,3 | 10,3 | 4,4 | 8,0 |
| | после | 53,2 | 22,7 | 8,8 | 1,8 | 8,5 |

Из приведенных в таблице 3 данных видно, что при использовании плавикового шпата и шамота содержание Al₂O₃ в шлаке до и после обработки на печи-ковше практически не изменяется, а с применением материала «РАНТАЛ 50ГР» оно выросло, в среднем, на 5,2 % (с 12,8% до 18,0%).

С целью определения влияния материала «РАНТАЛ 50ГР» на стойкость футеровки сталеразливочных ковшей при внепечной обработке всех плавов ковша № 23 в качестве разжижителя шлака использовался данный материал. Стойкость футеровки из огнеупоров производства ООО «Никомогнеупор» на опытной кампании составила 54 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа за 9 месяцев текущего года 49,7 плавов.

ВЫВОДЫ.

1. В августе-октябре 2007 года, для определения технологической целесообразности использования в качестве разжижителя шлака при внепечной обработке стали на установке «печь-ковш» проведено испытание опытного глиноземсодержащего материала «РАНТАЛ 50ГР» производства ООО «Рантал».

2. При вводе материала в ковш газовыделения, барботажа и вспенивания шлака не происходило.

3. Материал «РАНТАЛ 50ГР» обладает удовлетворительной разжижающей способностью, но необходимая жидкоподвижность шлака с применением плавикового шпата достигается быстрее, чем при работе с опытным материалом.

4. При использовании материала «РАНТАЛ 50ГР» содержание Al₂O₃ в шлаках до и после обработки на печи-ковше возросло, в среднем, на 5,2 %.

5. Значения степени десульфурации стали при использовании материала «РАНТАЛ 50ГР» и плавикового шпата близки и составляют 25,7% и 27,4 % соответственно; при использовании шамота – 18 %.

6. Стойкость футеровки из огнеупоров производства ООО «Никомогнеупор» ковша № 23, где в качестве разжижителя использовался материал «РАНТАЛ 50ГР» составила 54 плавки, при средней стойкости футеровок данного типа за 9 месяцев текущего года 49,7 плавов.

РЕКОМЕНДАЦИИ.

Данный материал может быть использован в качестве заместителя плавикового шпата на всем сортаменте сталей, выплавляемых в конвертерном цехе, кроме рельсового и колесобандажного металла, т.к. увеличение содержания Al_2O_3 в шлаке влечет рост содержания Al_2O_3 в составе неметаллических включений, что может отрицательно повлиять на эксплуатационные характеристики металла транспортного назначения.

Для дальнейшего изучения влияния материала «РАНТАЛ 50ГР» на стойкость футеровки сталеразливочных ковшей провести 5-8 кампаний ковшей с футеровкой различных производителей с использованием только данного материала на всех плавках кампании (за исключением рельсового и колесобандажного металла).

Начальник ЦАК

Ю.П.Петренко

Начальник сталеплавильной
лаборатории

П.В.Эккерт

Начальник лаборатории
эксплуатации огнеупоров

Д.В.Корюков

СОГЛАСОВАНО.
Начальник КЦ

Н.В.Мухранов

Приложение Е
(обязательное)

Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов (брикетов производства ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург) при внепечной обработке стали



Открытое акционерное общество
"Нижнетагильский металлургический комбинат"

ЦАК

06.10.2005 № 184-68-2219

 УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
А.В.Амелин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ по НИР

«Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов (брикетов производства ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург) при внепечной обработке стали»

Футеровка вакуум-камер в процессе эксплуатации подвергается механическому, химическому и температурному воздействию, что приводит к уменьшению объема огнеупора, снижению его прочности и массы. Одним из наиболее агрессивных факторов разрушения огнеупоров является взаимодействие со сталяплавильным шлаком. Наряду с химическим взаимодействием между огнеупорной футеровкой и шлаком в процессе работы происходит пропитка (инфильтрация) пор огнеупора шлаком.

Основной составляющей шлакового инфильтрата является двухкальциевый силикат ($2\text{CaO} \times \text{SiO}_2$), появляющийся при основности ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1.4$, т.е. в условиях работы НТМК. Накопление в порах огнеупоров двухкальциевого силиката и его последующий фазовый переход (изменение структуры кристаллической решетки) сопровождается увеличением объема до 12 % и приводит к глубоким трещинам и сколам футеровки.

Для снижения структурного растрескивания огнеупора необходимо стабилизировать шлак за счет повышения в нем содержания Al_2O_3 путем введения глиноземистого материала, способствующего образованию шпинели ($\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$), которая выделяется из шлакового расплава и способствует созданию защитного гарнисажа, препятствующего интенсивной пропитке огнеупоров.

В мае – сентябре 2005 года с целью определения целесообразности использования, в качестве разжижителя шлака при внепечной обработке стали на установках «печь-ковш», способствующей уменьшению износа огнеупорной футеровки патрубков вакуум-камер, проведена работа по использованию глиноземсодержа-

щих брикетов (производства ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург) взамен ОКД.

Химический состав брикетов приведен в таблице 1 (по данным лаборатории аналитического анализа ЦЛК).

Таблица 1

| Материал | Массовая доля, % | | | | | | | | | |
|----------|-------------------|--------------------------------|------------------|------|------|--------------------------------|-------------------|------------------|---------|------|
| | Al _{мет} | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | MgO | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | хлориды | ппп |
| брикеты | 3,2 | 55,7 | 6,04 | 1,91 | 12,6 | 2,74 | 4,3 | 3,70 | 8,10 | 11,9 |

Опытный материал применялся при внепечной обработке металла, который подвергался вакуумной обработке. При этом средняя стойкость огнеупорной футеровки четырех вакуум - камер производства «MWA», Германия составила 97,3 плавов. Средняя стойкость огнеупорной футеровки вакуум-камер того же производства без использования глинозёмистых брикетов – 69,8 плавов.

За указанный период глинозёмсодержащие брикеты использовались на двух кампаниях вакуум-камеры №1, зафутерованной огнеупорами производства «Dufesco», стойкость, которой составила 104 и 131 плавку.

Средний удельный износ огнеупорной футеровки третьего кольца впускного патрубка вакуум-камер при использовании брикетов – 1,60 мм/пл., без брикетов – 2,58 мм/пл.

Внепечная обработка металла проводилась согласно технологической инструкции ТИ 102-СТ.К-318-2004 “Внепечная обработка стали на установке “печь-ковш” и вакуумирование в циркуляционном вакууматоре”. Визуально оценивалось состояние шлака по ходу обработки - опытный материал имеет высокую разжижающую способность.

Проанализирована внепечная обработка 571 плавки различных марок сталей с использованием глинозёмсодержащих брикетов. Расход опытного материала изменялся от 1,0 до 2,6 кг/т стали и в среднем составил 1,8 кг/т стали.

Технологические параметры опытных и сравнительных плавов приведены в таблице 2.

Таблица 2

| металл | кол-во плавов, шт. | время обработки, мин. | содержание P, % | | содержание S, % | | степень десульфурации, % | расход брикетов, кг /т | всего ТШС кг/т |
|----------|--------------------|-----------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------------------|------------------------|----------------|
| | | | до обр-ки | после обр-ки | до обр-ки | после обр-ки | | | |
| опытный | 571 | 40 | 0,013 | 0,014 | 0,021 | 0,012 | 42,9 | 1,8 | 9,4 |
| сравнит. | 577 | 44 | 0,012 | 0,013 | 0,020 | 0,013 | 35,0 | - | 10,3 |

Изменение химического состава шлака на опытных и сравнительных плавках приведено в таблице 3.

Таблица 3

| Металл | шлаки | кол-во плавков, шт | Химический состав шлаков, % | | | | | основность | средний расход брикетов, кг/т |
|----------|--------------|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|-----|-----|------------|-------------------------------|
| | | | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | | |
| Опытный | до обр-ки | 571 | 32,3 | 26,9 | 8,8 | 9,0 | 3,3 | 1,20 | 1,8 |
| | после обр-ки | | 49,2 | 24,1 | 14,9 | 8,7 | 1,1 | 2,04 | |
| Сравнит. | до обр-ки | 577 | 36,9 | 29,2 | 8,6 | 7,9 | 2,9 | 1,26 | - |
| | после обр-ки | | 50,7 | 25,9 | 8,5 | 7,1 | 1,2 | 1,95 | |

Из анализа таблиц 2 и 3 следует, что при практически одинаковом времени обработки металла на установках «печь-ковш» и близком расходе твёрдых шлакообразующих материалов (ТШС) степень десульфурации, на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 против 35,0%). Это объясняется содержанием в брикетах около 3,0 % металлического алюминия, который способствует более глубокому раскислению шлака и высокой разжижающей способностью опытного материала. Среднее содержание Al₂O₃ в шлаках за время обработки сравнительного металла изменялось незначительно (от 8,6% до 8,5%), на опытных плавках содержание Al₂O₃ возросло с 8,8% до 14,9%.

ВЫВОДЫ.

При использовании глинозёмсодержащих брикетов производства ООО «РОИС» было установлено, что:

- опытный материал имеет высокую разжижающую способность;
- степень десульфурации на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9% против 35,0 %);
- среднее содержание Al₂O₃ в шлаках за время обработки сравнительного металла изменялось незначительно (от 8,6% до 8,5%); на опытных плавках содержание Al₂O₃ возросло с 8,8% до 14,9%;
- средняя стойкость вакуум-камер составила 97,3 плавки (без применения брикетов – 69,8 плавки);
- удельный износ огнеупоров впускного патрубка вакуум-камер снизился с 2,58 мм/пл. (без брикетов) до 1,60 мм/пл., т.е. на 37,9%.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для определения влияния глинозёмистых брикетов производства ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург на стойкость шлаковых поясов сталеразливочных ковшей провести испытания на двух-трёх кампаниях сталковшей.

2. Установить норму расхода глинозёмсодержащих брикетов на металле, подвергающемуся вакуумной обработке, в количестве 1,8-2,0 кг/т стали взамен ОКД.

Начальник технического
управления

А.А.Киричков

И.о. начальника ЦЛК-
зам. начальника ЦЛК по науке и НИР

Е.В.Шеховцов

Начальник сталеплавильной
лаборатории

П.В.Эккерт

Начальник лаборатории
эксплуатации огнеупоров

Д.В.Корюков

СОГЛАСОВАНО
Главный сталеплавильщик

Ю.А.Данилин

Начальник КЦ

В.М.Кулик

Приложение Ж
(обязательное)

Использование глиноземсодержащих шлакообразующих материалов при
внепечной обработке стали



Центральная лаборатория
комбината

№ 184-68-148 от 26.01.05

УТВЕРЖДАЮ
И.о. начальника ЦЛК
Е.В. Шеховцов

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ по НИР
«Использование глинозёмистых шлакообразующих
материалов при внепечной обработке стали».

Наиболее агрессивное воздействие на огнеупорную футеровку шлаковых поясов сталковшей и патрубков вакуум-камер оказывает сталеплавильный шлак. Значительное повышение стойкости футеровок даёт метод нанесения на кладку тормозящих износ защитных покрытий. Главной составляющей защитного поверхностного слоя (гарнисажа) является шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$, которая образуется при повышении содержания Al_2O_3 в шлаках более 15%.

В 2004 году, с целью определения целесообразности использования в качестве разжижителя шлака при внепечной обработке стали на установках «печь-ковш», способствующего уменьшению износа огнеупорной футеровки шлаковых поясов сталковшей и патрубков вакуум-камер, проведена работа по использованию глинозёмистых материалов разных производителей (ООО «Втормет», г. Москва; ОГП ОАО «НТМК» и ОООИ «РОИС», г. Екатеринбург).

Глинозёмистый материал производства ОГП ОАО «НТМК» был двух марок ШНД-1 и ШНД-2. ШНД-1 изготовлена на основе бокситов производства КНР и шамота Аркалыкского. ШНД-2 изготовлена на основе заполнителя муллитокорундового и шамота Аркалыкского.

Химический состав опытных материалов приведен в таблице 1.

Таблица 1

| Материал | Массовая доля, % | | | | | | | | |
|---------------------------|------------------|-----------|---------|-------|-------|-----------|---------|--------|---------|
| | $Al_{мет}$ | Al_2O_3 | SiO_2 | CaO | MgO | Fe_2O_3 | Na_2O | K_2O | хлориды |
| Брикеты, ООО «Втормет» | 10-20 | 36,50 | 8,84 | 1,84 | 5,10 | 1,83 | 11,6 | 13,8 | 24,5 |
| Окатыши, ООО «РОИС» | 5-7 | 44,0 | 6,8 | 4,9 | 10,5 | 1,5 | 5,3 | 2,2 | 9,8 |
| ШНД-1, ОГП | - | 67,1 | - | 1,16 | 1,36 | 2,28 | - | - | - |
| ШНД-2, ОГП | - | 70,6 | - | 0,67 | 1,09 | 1,64 | - | - | - |

Всего было проведено 235 опытных плавов различных марок сталей. Средний расход опытных глинозёмистых материалов указан в таблице 2.

Внепечная обработка металла проводилась согласно технологической инструкции ТИ 102-СТ.К-318-2004 “Внепечная обработка стали на установке “печь-ковш” и вакуумирование в циркуляционном вакууматоре”. По ходу обработки визуально оценивались состояние и жидкоподвижность шлака при разных расходах опытного материала.

Согласно Программе НИР по использованию глинозёмистых материалов при внепечной обработке стали, на первом этапе испытаний опытных добавок оценивались следующие технологические параметры при вводе материала в сталеразливочный ковш с металлом: разжижающая способность; количество выделяющихся газов и степень десульфурации шлаков.

В процессе работы выяснилось, что:

- самую высокую разжижающую способность имеют глинозёмистые окатыши производства ОООИ «РОИС», немного ниже - шлаконаводящие добавки ШНД-1 и ШНД-2 производства ОГП и самую низкую – глинозёмистые брикеты производства ООО «Втормет».

- после ввода глинозёмистых брикетов ООО «Втормет» и окатышей ОООИ «РОИС» происходило выделение газа, но при использовании материала производства ООО «Втормет» – более сильное и продолжительное, а так же значительное вспенивание шлака, затрудняющие процесс обработки стали. Это связано с более высоким содержанием в брикетах легкоиспаряющихся соединений калия, натрия и хлора (по сравнению с материалом ОООИ «РОИС»).

Технологические параметры опытных и сравнительных плавов приведены в таблице 2.

Таблица 2

| металл | кол-во плавов, шт. | обр-ка, мин | сод-е Р, % | | сод-е S, % | | степень десульф % | Средний расход ТШС, кг/т | | | | всего тпс, кг/т |
|----------|--------------------|-------------|------------|--------------|------------|--------------|-------------------|--------------------------|------|------------------|------|-----------------|
| | | | до обр-ки | после обр-ки | до обр-ки | после обр-ки | | *** | CaO | CaF ₂ | окл | |
| брикет | 165 | 45 | 0,013 | 0,013 | 0,022 | 0,012 | 45,5 | 1,58 | 6,12 | 1,58 | 1,01 | 10,29 |
| ШНД-1 | 12 | 35 | 0,010 | 0,011 | 0,020 | 0,014 | 25,5 | 1,74 | 4,36 | 0,51 | 0,84 | 7,45 |
| ШНД-2 | 21 | 36 | 0,012 | 0,013 | 0,016 | 0,013 | 18,8 | 1,62 | 5,06 | 0,61 | 0,03 | 7,32 |
| окатыш | 37 | 38 | 0,012 | 0,014 | 0,021 | 0,012 | 42,9 | 1,50 | 6,0 | 0,28 | 0,43 | 8,21 |
| сравнит. | 196 | 45 | 0,009 | 0,009 | 0,020 | 0,014 | 30,0 | - | 5,68 | 1,55 | 1,48 | 8,71 |

Примечание: ***- средний расход глинозёмистых материалов.

Из анализа таблицы 2 следует, что при сопоставимом времени обработки металла на установках «печь-ковш» и близком расходе твёрдых шлакообразующих материалов (ТШС), самая высокая степень десульфурации достигнута при использовании глинозёмистых брикетов и окатышей (45,5% и 42,9% соответственно). Это объясняется содержанием в них металлического алюминия, который способствует более глубокому раскислению шлака, чем ферросилиций. Степень десульфурации шлаков на плавках с ШНД ниже и составляет 25,5% и 18,8%. На сравнительном металле, где ввод глинозёмистых материалов не производился, степень десульфурации составляла 30,0%.

Изменение химического состава шлаков на опытных и сравнительных плавках приведено в таблице 3.

Таблица 3

| материал | шлаки | кол-во шлаков, шт | Химический состав шлаков, % | | | | | основность | средний расход брик. кг/пл. | FeSi для раскисл. шлака, кг/т |
|----------|--------------|-------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|------|-----|------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | | | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | | | |
| брикеты | до обр-ки | 44 | 36,7 | 24,0 | 6,4 | 9,9 | 6,2 | 1,5 | 279 | - |
| | после обр-ки | | 55,7 | 21,0 | 11,2 | 7,7 | 1,1 | 2,7 | | |
| окатыши | до обр-ки | 37 | 35,8 | 24,5 | 7,6 | 10,1 | 5,3 | 1,5 | 230 | - |
| | после обр-ки | | 52,3 | 22,1 | 13,5 | 9,1 | 1,1 | 2,4 | | |
| ШНД-1 | до обр-ки | 12 | 34,7 | 24,9 | 6,9 | 10,8 | 5,2 | 1,4 | 270 | - |
| | после обр-ки | | 43,5 | 26,4 | 13,8 | 9,8 | 1,6 | 1,6 | | |
| ШНД-2 | до обр-ки | 21 | 36,5 | 23,2 | 7,4 | 10,7 | 7,4 | 1,6 | 251 | - |
| | после обр-ки | | 52,6 | 23,0 | 11,5 | 8,6 | 2,7 | 2,3 | | |
| Сравнит. | до обр-ки | 72 | 38,8 | 25,3 | 8,0 | 10,3 | 4,4 | 1,5 | - | 0,24 |
| | после обр-ки | | 53,2 | 24,7 | 8,5 | 8,8 | 1,8 | 2,2 | | |

Данные таблицы 3 показывают, что содержание FeO в шлаках после внепечной обработки при использовании глинозёмистых брикетов и окатышей составило 1,1%. При использовании ШНД-1 и ШНД-2 – 1,6% и 2,7% соответственно. На сравнительных шлаках – 1,5 – 1,8%. На опытных плавках при использовании всех глинозёмистых материалов (брикетов, ШНД-1, ШНД-2 и окатышей) увеличилось среднее содержание Al₂O₃ в шлаках. При использовании брикетов - на 42,9%, ШНД-1 – на 50% (13,8% против 6,9%); ШНД-2 – 35,7% (11,5% против 7,4%); окатышей – 43,7% (13,5% против 7,6%).

Основная масса ШНД-1 имела фракцию 10-30 мм, а ШНД-2 - менее 20 мм. При этом часть материала (особенно при использовании ШНД-2) просыпалась на транспортёрах и выносилась в фильтры аспирации из-под крышек установок «печь-ковш». Это объясняет меньший рост содержания Al₂O₃ в шлаках после внепечной обработки при использовании ШНД-2.

На сравнительном металле содержание Al₂O₃ в шлаках, за счёт ввода шлакообразующих материалов, после внепечной обработки практически не изменялось.

ВЫВОДЫ

При использовании глинозёмсодержащих шлакообразующих материалов было установлено, что:

- самую высокую разжижающую способность имеют глинозёмистые окатыши производства ОООИ «РОИС», немного ниже - шлаконаводящие добавки ШНД-1 и ШНД-2 производства ОГП и самую низкую – брикеты производства ООО «Втормет»;

- после ввода глинозёмистых брикетов ООО «Втормет» и окатышей ОООИ «РОИС» происходило выделение газа, но при использовании материала производства ООО «Втормет»-более сильное и продолжительное, сопровождающееся вспениванием шлака и затрудняющее процесс обработки стали. Это связано с более высоким содержанием в брикетах легкоиспаряющихся соединений калия, натрия и хлора (по сравнению с материалом ОООИ «РОИС»).

- самая высокая степень десульфурации достигнута при использовании глинозёмистых брикетов и окатышей (45,5% и 42,9% соответственно). Это объясняется содержанием в них металлического алюминия, который способствует более глубокому раскислению шлака, чем ферросилиций;

РЕКОМЕНДАЦИИ

Для дальнейших испытаний глинозёмистых материалов необходимо:

1. Увеличить фракцию шлаконаводящих добавок ШНД-1 и ШНД-2 производства ОГП до 20-70 мм.

2. Снизить содержание легкоиспаряющихся соединений калия, натрия и хлора (в сумме – не более 8,0%) в глинозёмистых брикетах производства ООО «Втормет» и глинозёмистых окатышах производства ООО «РОИС»..

3. Определить их влияние на стойкость огнеупорной футеровки шлаковых поясов сталковшей и патрубков вакуум-камер (провести испытания материала на 2-3 кампаниях сталковшей и 2-3 кампаниях вакуум-камер).

Начальник сталеплавильной
лаборатории



П.В.Экерт

И.о.начальника группы
внепечной металлургии



Л.В.Матвеева