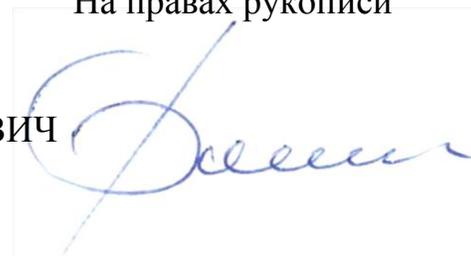


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ им. И.П. БАРДИНА»

На правах рукописи

БОЖЕСКОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ



**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ И НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ С
НОРМИРУЕМЫМ НИЖНИМ ПРЕДЕЛОМ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ
И СЕРЫ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ РАЗЛИВАЕМОСТИ**

05.16.02 – Metallurgy of black, colored and rare metals

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Топтыгин Андрей Михайлович
старший научный сотрудник
кандидат технических наук,
ФГУП «Центральный Научно-
Исследовательский Институт черной
металлургии им. И.П. Бардина»

Москва – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	10
1.1 Механизм образования и отложения неметаллических включений	10
1.2. Роль промежуточного ковша и методы оптимизации его конструкции.....	33
Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	40
2.1. Проведение металлографических исследований.....	40
2.2 Анализ химического состава металла.....	41
2.3 Определение химического состава металлургических шлаков	42
2.4 Измерение температуры.....	43
2.5. Методики определения физических свойств шлаковых расплавов	43
Глава 3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ.....	45
3.1 Термодинамическая оценка возможности образования оксидной и сульфидной фаз при обработке металла кальцием.....	47
3.2 Металлографические исследования.....	53
3.3. Изучение свойств покровного шлака в процессе серийной разливки стали	56
Глава 4. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ	64
Глава 5. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ	93
5.1. Теоретическое обоснование.....	93
5.2. Моделирование промежуточного ковша	106
Глава 6. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ	116
Глава 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
Приложение 1. Патент. Способ внепечной обработки.....	133
Приложение 2. Патент. ШОС ддля защиты металла в промежуточном и сталеразливочном ковшах.	134
Приложение 3. Акт внедрения.....	135
Приложение 4. Расчет экономического эффекта.....	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

На сегодня преобладающим процессом разливки стали является непрерывная разливка, обеспечивающая получение качественной продукции широкого марочного и размерного сортамента. Однако нельзя утверждать, что к настоящему времени решены все технологические вопросы, связанные с непрерывной разливкой, и у металлургов отсутствуют проблемы. Так, значительную долю производства электросталеплавильного цеха АО «Волжский трубный завод» составляет квадратная заготовка сечением 360×360 мм из стали С45Е. Сталь С45Е характеризуется как высоким содержанием алюминия, так и повышенным содержанием серы, и при ее разливке основной проблемой является зарастание внутренней полости огнеупорного погружного стакана, что приводит к прекращению серии разливки на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ), возврату плавки, снижению производительности и повышению себестоимости. Кроме того, прокат из таких плавок проходит ультразвуковой контроль у заказчика, металл сильно загрязнен неметаллическими включениями экзогенного типа, в том числе крупными.

Производство этих сталей осуществляется по следующей технологической схеме: дуговая сталеплавильная печь – ковш-печь № 1 – ковш-печь № 2 – установка скачивания шлака из ковша – ковшовый вакууматор – машина непрерывного литья заготовок.

Исследованием проблем зарастания погружных стаканов ранее занимались такие специалисты, как:

Аксельрод Л.М., Дуб В.С., Григорович К.В., Вдовин К.Н., Роцин В.Е., Смирнов А.Н., Михайлов Г.Г., Казаков А.А., Зюбан Н.А., Паршин В.М. и др.

Цель работы:

Улучшить разливаемость среднеуглеродистой стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы, снизив степень зарастания огнеупорных погружных стаканов посредством снижения содержания неметаллических включений.

Задачи работы:

- Определить основные причины, вследствие которых происходит «закупоривание» разливочных стаканов при непрерывной разливке среднеуглеродистой стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы.

- Разработать технологию, обеспечивающую снижение «закупоривания» разливочных стаканов при непрерывной разливке среднеуглеродистой стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы.

- Разработать оптимальный состав ШОС для сталеразливочного ковша, с ассимилирующей способностью, обеспечивающей удаление неметаллических включений при непрерывной разливке и повышение разливаемости стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы.

- Изменить основные конструктивные параметры промежуточного ковша для улучшения ассимиляции неметаллических включений.

- Провести опытно-промышленный эксперимент в электросталеплавильном цехе АО «Волжский трубный завод» для среднеуглеродистой стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы.

Научная новизна работы

1. Развита представления о существенном влиянии шлака сталеразливочного ковша на состав и свойства шлака промежуточного ковша применительно к условиям разливки среднеуглеродистой низколегированной стали с нормируемым нижним пределом алюминия и серы. Показано, что при высокой основности шлака сталеразливочного ковша (2,5-3,0) меняется химический состав и рафинирующая способность шлака промежуточного ковша за счет попадания шлака сталеразливочного ковша в промежуточный ковш в конце разливки каждой плавки в серии.
2. Уточнены области концентраций алюминия и серы, при которых наблюдается перераспределение состава неметаллических включений в сторону большего количества алюминатов кальция и снижения его сульфидов. При уменьшении содержания алюминия от 0,050 до 0,020 % и серы от 0,035 до 0,020 % количество связанного в сульфиды кальция снижается примерно в три раза - с 0,0080 до 0,0030 %, а количество кальция, связанного в оксиды, возрастает с 0,0050 до 0,0100 %, что обеспечивает лучшую разливаемость стали.
3. Предложен алгоритм разработки химического и компонентного состава шлакообразующих смесей для сталеразливочного ковша при непрерывной разливке, в основе которого лежит комплексный подход формирования шлакообразующих смесей, который учитывает достижение необходимых свойств ШОС (вязкость 0,7 – 1,5 Па·с, температура растекания не выше 1250 °С, быстрое расплавление в ковше) при низкой стоимости смеси.
4. Сформулированы с помощью физического моделирования гидравлических потоков для 4-х ручьевого Т-образного промежуточного ковша МНЛЗ при разливке стали С45Е, научно обоснованные требования по снижению средней скорости потока металла до 0,004-0,005 м/с, увеличению времени его пребывания

в ковше до 7-8 минут и снижению локальной скорости потоков у границы металл-шлак до 0,10-0,15 м/с для обеспечения лучшей ассимиляции шлаком всплывающих неметаллических включений. Полученные данные положены в основу технических решений.

Практическая значимость работы:

- Разработан состав шлакообразующей смеси для сталковша, обеспечивающий сохранение ассимилирующей способности шлака промежуточного ковша к глинозёмистым и сульфидным включениям на протяжении разливки всей серии плавов.

- Разработан новый шлаковый режим в сталковше при внепечной обработке стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы, обеспечивающий снижение степени зарастания огнеупорных погружных стаканов и повышение серийности разливки.

- Разработаны новая конструкция промежуточного ковша увеличенной емкости и нового металлоприемного устройства, обеспечивающие снижение зарастания разливочных стаканов и улучшение разливаемости.

- В 5,86 раза сокращен средний показатель по числу замен стаканов, приходящихся на одну плавку.

Степень изученности вопроса

К настоящему времени достаточно много работ посвящено изучению проблемы разливаемости стали и снижению затягивания погружных стаканов в процессе непрерывной разливки. Однако следует отметить, что в первую очередь эти работы посвящены автолистовым сталям.

Недостаточно полно изучены следующие вопросы:

- недостаточно развиты представления о влиянии шлака сталеразливочного ковша на состав и свойства шлака промежуточного ковша применительно к условиям разливки среднеуглеродистой низколегированной стали с нормируемым нижним пределом алюминия и серы.

- не уточнены области концентраций алюминия и серы, при которых наблюдается перераспределение состава неметаллических включений в сторону большего количества алюминатов кальция и снижения его сульфидов, что обеспечивает лучшую разливаемость стали.

- нет надежной методики разработки химического и компонентного состава шлакообразующих смесей для сталеразливочного ковша при непрерывной разливке, которая обеспечивала бы достижение необходимых свойств ШОС при низкой стоимости смеси.

- не сформулированы научно обоснованные требования по снижению средней скорости потока металла, увеличению времени его пребывания в ковше и снижению локальной скорости потоков у границы металл-шлак для обеспечения лучшей ассимиляции шлаком всплывающих неметаллических о моделирования гидравлических потоков для 4-х ручьевого Т-образного промежуточного ковша МНЛЗ при разливке стали С45Е.

Объектом исследования являются среднеуглеродистые стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы.

Предмет исследования:

– закономерности перераспределения кальция в жидкой стали от сульфидов к оксидам при различных режимах внепечной обработки стали С45Е;

– закономерности взаимодействия шлака стальковша со шлаком промежуточного ковша при разливке серии плавок;

– закономерности распределения скоростей и направлений потоков металла в промежуточном ковше.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов, п. 14 «Metallургические шлаки и их использование», п. 16 «Разливка продуктов плавки и методы непрерывной разливки».

Апробация

Основные результаты работы обсуждались на следующих конференциях:

– VI Конференция молодых специалистов в ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» «Перспективы развития metallургических технологий» (25–26 февраля 2015 г., Москва);

– Международная конференция «Мировые тенденции развития технологии непрерывной разливки стали» (15 декабря 2017 г., Москва).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано одиннадцать работ, в базах WOS/Scopus 9 работ, в перечне ВАК 9 работ (7 статей + 2 патента).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 19 таблиц. Список использованной литературы включает 91 наименование отечественных и зарубежных авторов.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Механизм образования и отложения неметаллических включений

Качество заготовки, отлитой непрерывным способом, напрямую связано со стабильностью этого процесса. Одним из основных критериев стабильности разливки является постоянство скорости. Накопление неметаллических включений внутри погружного стакана, стакана-дозатора в промежуточном ковше и в каналах плит шиберных затворов приводит к сужению просвета металлопроводки и, как следствие, к снижению скорости разливки либо ее остановке.

На сегодня присутствуют различные взгляды на процесс «затягивания» металлопроводки, соответственно, металлургами применяются различные технологические методы и технические решения для стабилизации процесса разливки. Для снижения рисков незапланированных прекращений разливки, сокращают количество разливаемых плавов в серию, производят вдувание аргона как в стопора, так и в дозаторы, применяют металлопроводку защищающую от окисления стали, ну и, как безвыходная мера - прибегают к принудительной замене стаканов, при этом обрабатывая разливочный тракт кислородом [1].

Изучая данную проблему более детально, металлурги постепенно вносят изменения в процесс непрерывной разливки стали.

Различными доступными методами были изучены нарастания внутри погружных стаканов [2]. Исследования показали, что основными оксидами являются глинозем (62...67 %), оксид магния (9...1 %), оксид кальция (12,5 %), капли металла, перемешанные с оксидами железа и небольшое количество оксида кремния (до 3 %). Характерный состав отложений представлен следующими фазами: Al_2O_3 , $CaO \cdot 2Al_2O_3$, $CaO \cdot 6Al_2O_3$, $MgO \cdot Al_2O_3$, а также в отдельных случаях

CaS [3].

На сегодня не существует единого мнения о точном механизме зарастания стаканов, поэтому используется много различных методов борьбы с зарастанием. В результате многочисленных теоретических исследований и практических опытов выработан широкий комплекс необходимых технологических мероприятий и условий, влияющих на снижение интенсивности зарастания стаканов.

Явление зарастания характеризуется параметром, представляющим собой количество отложений на внутренней поверхности разливочного стакана или погружной трубы. Интенсивность затягивания металлопроводки напрямую зависит от активности кислорода и свободного алюминия в стали. Поэтому основным способом снижения зарастания металлопроводки является повышение чистоты стали по неметаллическим включениям при внепечной обработке.

Наличие в стали неметаллических включений приводит к налипанию этих включений на стенках разливочных стаканов, что является причиной их зарастания (затягивания). В любой чистой стали имеет место наличие включений. Немалое количество неметаллики в стали образуется после ее внепечной обработки. Исследования показали, что в 150 т стали при классическом раскислении содержится около 1,5...2 л корунда, при этом содержание кислорода в ней 15 ppm. Такое количество неметаллических включений уже приводит к нестабильной разливке [3].

В процессе непрерывной разливки стали отложения, образующиеся внутри металлопроводящего тракта, оказываются наиболее острой проблемой, и на предприятиях они постоянно являются камнем преткновения в проработке новых марок стали.

При разливке неметаллические включения коагулируются в промежуточном ковше, на стопорах, затем обваливаются в металлопроводящий тракт, налипают на

внутренней поверхности, уменьшают диаметр тракта и в конце концов приводят к полному закупориванию отверстия. В результате нарушается стабильность режима непрерывной разливки стали.

Таким образом, процесс зарастания стаканов приводит к проблемам при разливке стали. Отложения, образующиеся на внутренней поверхности дозирующей системы, влияют на формирование потока металла. Имеет место несимметричность подвода жидкого металла, что приводит к колебаниям уровня металла в кристаллизаторе, нарушению ранта, к нестабильному проплавлению ШОС. Все это ведет к риску потери качества заготовки. Слипшиеся куски неметаллических включений легко заносятся в струю и попадают в кристаллизатор. Всплывая на мениске, они могут образовывать «настыли», которые прилипают как к стенкам кристаллизатора или погружного стакана, так и к стенке кристаллизатора, что может привести к еще большим сложным последствиям, таким как нарушение охлаждения и прорыв.

Во избежание таких последствий специалисты вводят контрмеры, такие как:

- снижение количество плавов, разливаемых через один промежуточный ковш;
- модификация кальцием твердых включений глинозема с образованием легкоплавких алюминатов кальция $x\text{CaO}\cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$;
- подача аргона в те зоны металлопроводящего тракта, где наиболее вероятно вторичное окисление, а именно такие, как защитная труба, стаканы и стопоры промежуточного ковша, плиты шиберных затворов [84].

Снижение числа плавов, разливаемых через один промежуточный ковш, приводит к повышению себестоимости стали из-за роста количества огнеупоров на единицу продукции и снижению производительности.

Обработка стали кальцием – крайняя мера, так как данный процесс качества не прибавляет, да и возможен не всегда, из-за ограничения в сортаментном ряде

производимых сталей.

Положительно на разливаемость влияет подводка аргона в металлопроводку, но в последнее время металлурги все чаще отказываются от этой меры, так как пузырьки аргона, проходя глубоко в сталь, запутываются в ней, что приводит к таким дефектам как газовый пузырь. Данный дефект снижает качество продукта на последующем переделе. Отложения на внутренней стороне погружного стакана уменьшают площадь внутреннего сечения, что приводит к падению скорости разливки вплоть до ее остановки. Для устранения этой проблемы используют замены стаканов, но каждая замена – это торможение разливки, а затем набор скорости, т.е. нестабильность процесса, что приводит к снижению качества литой заготовки. Затягивание возможно устранить такими методами, как «подбивание» стопорных механизмов или автоматическое встряхивание, обработка узла кислородом, что ведет к остановке ручья и также приводит к потере качества.

Установлено, что риск затягивания стаканов снижается при их дополнительном нагреве до 1200 °С, такой способ зарекомендовал себя лучше, чем низкотемпературный подогрев. Глинозем, вступая в реакцию с графитом в огнеупорах и с алюминием в стали, приводит к «затягиванию ручья». Исходя из этого были разработаны усовершенствованные огнеупоры из корундографита и магнезиальных вставок [85], также в некоторых случаях применяются вставки в шлаковой зоне из диоксида циркония с графитом. При испытаниях изделия также нагревали до 1200 °С в течение 40 мин, обматывали каолиновой ватой. При таком способе количество неметаллических включений было минимальным, тогда как у традиционных огнеупоров зарастания могли происходить уже через 30 мин от начала разливки, и в течение 240 мин разливка прекращалась полностью из-за нестабильности подачи металла [4].

Основные причины формирования отложений в погружном стакане следующие:

- раскисление алюминием;
- вторичное окисление алюминия в стали кислородом из различных источников;
- из шлака в сталеразливочном ковше;
- из огнеупоров;
- из атмосферного воздуха.

В компании Voest Alpine Stahl GmbH для уменьшения зарастания металлопроводящего тракта используют технологию оптимизации содержания титана в стали. Рост содержания фосфора и титана изменяет поверхностное натяжение, что приводит к увеличению количества и размера мелких оксидов и росту их склонности к отложению.

Для успешной ассимиляции включений необходимо их свободное растворение в шлаке. Это возможно при максимальном значении свободной энергии частиц и минимальном межфазном натяжении в шлаке. Это усиливает процесс перехода неметаллических включений из стали в шлак [5].

Возможно ускорение данного процесса, чем и пользуются большинство предприятий. Это подача аргона в пробки сталеразливочного ковша, который интенсифицирует переход включений через границу металл-шлак за счет ускорения доставки их к этой границе. В случае смачивания шлаком неметаллических включений большая их часть весьма хорошо им поглощается.

Одним из важнейших факторов, влияющих на способность шлака поглощать алюминаты, является его основность. Бывают «кислые», «основные» и «среднеосновные» шлаки: первые на базе оксидов $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, вторые на базе оксидов $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ и третьи на базе оксидов $\text{CaO(MgO)-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.

По данным работы [6], среднеосновные шлаки имеют степень поглощения включений не больше 1 %. Основные с основностью больше трех имеют возможность поглощения до 10...30 % включений. По данным [7], чем выше

основность шлака, тем его способность к ассимиляции включений более высокая. А низкая концентрация кислорода, оксида алюминия в шлаке способствует адсорбции.

По данным [8], высокоосновный шлак дает возможность значительно уменьшить запароченность металла включениями оксидного состава в сравнении с кислыми шлаками. Содержание кислорода снизилось в два раза: с 39...41 до 19...21 ppm.

По данным [9], ассимилирующие свойства среднеосновных шлаков повышаются при добавлении фтора в небольших количествах.

Вязкость шлака – важный фактор для ассимиляции включений: чем она ниже, тем выше ассимиляция, а наличие в нем добавок, снижающих также и температуру плавления (фтора, оксидов натрия, калия и лития, оксидов марганца и железа) является определяющим [10].

Установлено, что количество вводимых кальцийсодержащих материалов влияет на содержание CaO во включениях и возрастает от 11 до 56 % (после введения FeCa) [11]. Затем снижается до 33 % в промежуточном ковше и далее возрастает до 45 % в заготовке, в результате вторичного окисления кальция.

Содержание SiO₂ во включениях (продукт раскисления) к исходу внепечной обработки снижается и увеличивается во время следующего передела от 0 до 21 % в результате взаимодействия кремния с кислородом, растворимость которого падает по мере уменьшения температуры при кристаллизации.

Источниками Al₂O₃ являются алюминий, вносимый на установке ковш-печь, и глиноземистая футеровка днища сталеразливочного ковша. Оксид алюминия из жидкой стали переходит в литую заготовку, а затем и в готовый прокат. Снижение содержания Al₂O₃ во включениях на участке «промежуточный ковш – НЛЗ» и в конечной продукции обусловлено увеличением на этом участке концентраций CaO и SiO₂.

Содержание алюминия в металле зачастую составляет 0,002 %, но из-за большего, чем у кремния сродства к кислороду, имеет место образование третичных включений глинозема.

В работе [12] показано, что повышение доли Al_2O_3 в неметаллических включениях ведет к возрастанию вязкости, росту поверхностного натяжения, повышению точки плавления и падению плотности. Поставщиком экзогенных включений, как правило, служит футеровка. Отмечено [13], что по мере износа футеровки сталеразливочного ковша после 18 плавов с внепечной обработкой возрастает общее число включений и содержание кислорода в металле.

Наблюдаются два типа включений: содержащие оксидный раствор с составом, близким к $3CaO \cdot Al_2O_3$, и включения, содержащие этот оксидный раствор и MgO . Эти фазы присутствуют в слое футеровки, пропитанном шлаком из ковшового гарнисажа. Ковшовый гарнисаж образуется в процессе кантования ковша для слива остатков металла и шлака, при этом стенки ковша покрываются шлаковой пленкой. Результаты исследований металлургов показали, что количество включений в пробах, отобранных из сталеразливочных ковшей, всегда возрастает с износом футеровки промежуточного ковша не взирая на различия в технологических параметрах разливки.

Одним из наиболее важных представляется механизм [14] удаления неметаллических включений посредством их всплытия в покровный шлак при флотации пузырьками аргона. Крупные включения (более 25 мкм) удаляются в шлак в основном флотацией в «стоксовоом» режиме, а более мелкие – флотацией в пузырьковом режиме. Крупные пузырьки позволяют интенсифицировать процесс удаления.

Для производства высококачественного автолиста была предложена специальная технология выплавки и разливки стали [15]. Эта технология, включающая обработку стали на вакууматоре и печи-ковше, позволила получить

в конечной пробе из ковша концентрации углерода, азота, серы и фосфора: 27,1; 31; 75; 75 ppm, соответственно.

Для повышения разливаемости стали, раскисленной алюминием, расплав обрабатывают кальцием в порошковой проволоке. Он модифицирует тугоплавкие включения в легкоплавкие. Принято считать, что оптимальное отношение содержания кальция к содержанию алюминия составляет 0,14 [16].

Авторами [17] отмечается, что внезапное изменение массы разливаемой заготовки происходит при изменении формы оксидов (рисунок 1). Наилучшая разливаемость наблюдается при отношении содержания кальция к содержанию алюминия более 0,10.

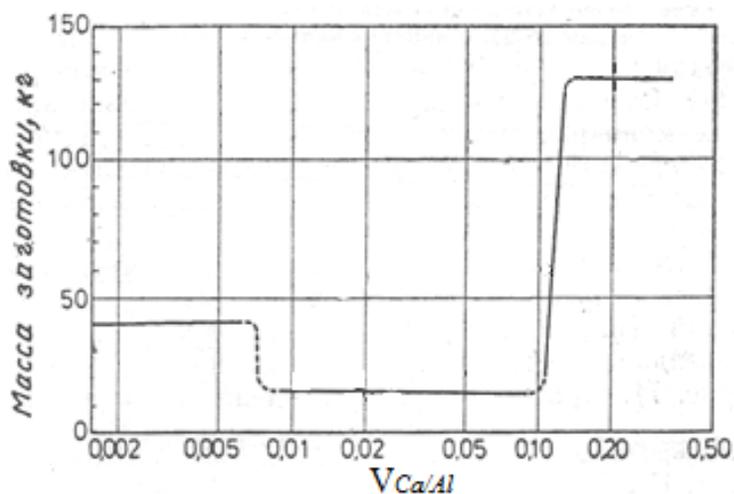


Рисунок 1. Зависимость между степенью сужения сечения разливочного стакана, выраженной массой разливаемой заготовки, и отношением содержания кальция и алюминия ($V_{Ca/Al}$) в заливочной воронке

Этими же авторами выявлено, что литейные свойства ухудшаются не только в результате присутствия включений Al_2O_3 , но и включений CaS , образование которых происходит при присадке определенного количества кальция (рисунок 2).

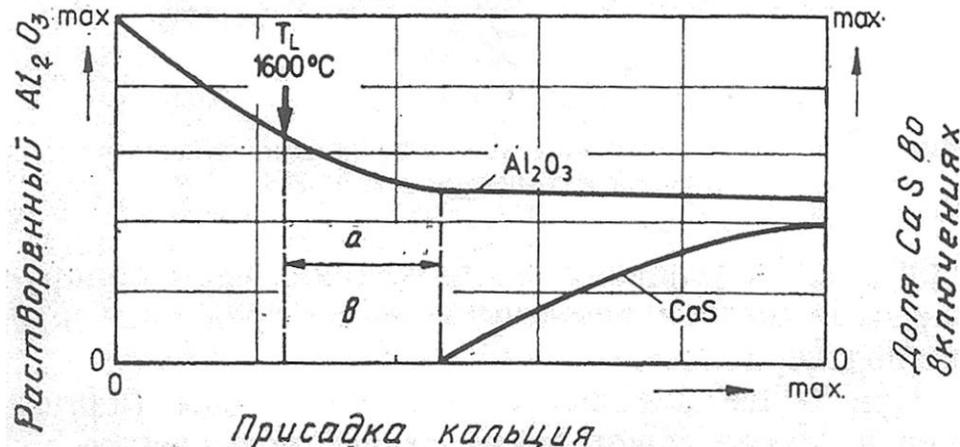


Рисунок 2. Изменение состава включений в ходе обработки стали кальцием: *a* – «окно разливаемости»

При определенном количестве присадок кальция образуются включения типа $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ с высокой температурой плавления (1850°C), и поэтому они находятся в стали в твердом состоянии. При присадке кальция в оптимальном количестве возникают более благоприятные включения типа $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ с температурами плавления менее 1600°C . При избыточной присадке кальция начинают образовываться включения сульфидов кальция с высокой температурой плавления, в связи с чем они находятся в металле в твердом состоянии, что приводит к зарастанию стакана-дозатора и погружного стакана.

Другими авторами [18] также отмечалось, что для сталей с регламентированным содержанием серы выше $0,025\%$, а алюминия в пределах $0,020 \dots 0,040\%$ способность к разливке еще больше сужается. В зависимости от присадок кальция изменяются тип и количество включений (рисунок 3).

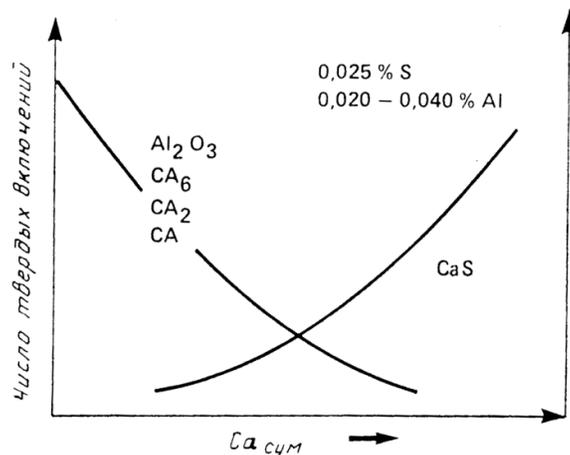


Рисунок 3. Влияние присадок кальция на тип и количество включений

Схема модификации включений при обработке металла кальцием приведена на рисунке 4. Алуминаты, находящиеся при температуре разливки в твердом состоянии, реагируют с кальцием с образованием жидких алуминатов кальция, которые не вызывают зарастания разливочных стаканов. Еще одним результатом присадки кальция является уменьшение образования включений сульфидов марганца, а также изменение их формы на шаровидную. Образующиеся вместо них включения $CaS - CaO - Al_2O_3$ при прокатке не деформируются, что приводит к повышению изотропности механических свойств стали.

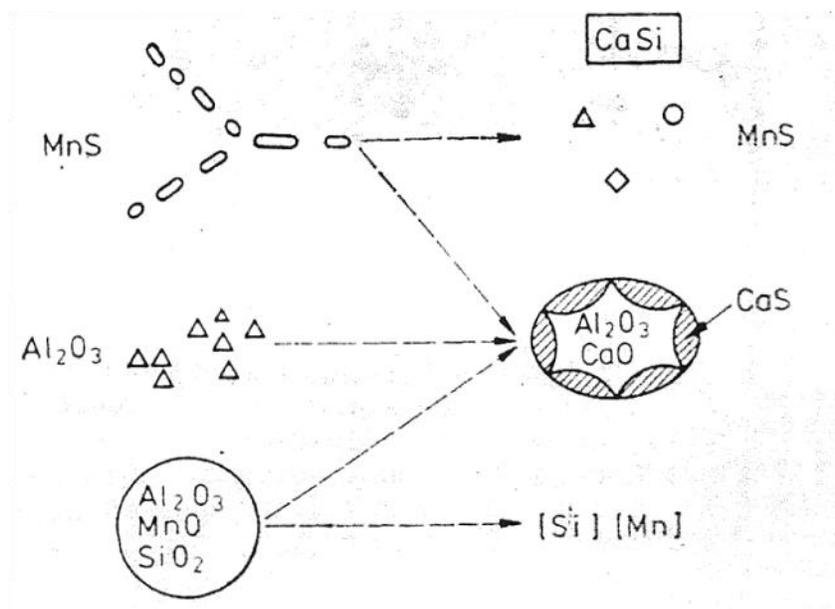


Рисунок 4. Схема модификаций включений

Можно выделить следующие механизмы образования комплексных оксисульфидов:

1) Сильное десульфуризирующее воздействие первичных частиц $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, реагирующих с присутствующей в расплаве серой, приводит к образованию отложений сульфидов на их поверхности;

2) Другой механизм основан на том, что в расплаве присутствует однородное соединение $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CaS}$. При охлаждении выделяется CaS (вследствие уменьшения его растворимости в $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$), с образованием кольцеобразной оболочки, что, видимо, определяется действием поверхностного натяжения;

3) Третьим механизмом образования двухфазных включений может быть спекание частиц $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и CaS . Повторяющееся столкновение частиц с их последующей диффузией может приводить и к образованию однофазных включений;

4) При присадке больших количеств кальция содержание CaO и CaS в сердцевине и наружной оболочке слитка настолько повышается, что частицы могут превратиться в соединение $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaS}$.

Идеально подобранное количество присадок кальция позволит не нарушать ход разливки. Авторами работы [17] отмечается, что слишком большая или слишком малая присадка кальция приводит к износу материала разливочного стакана или к образованию отложений оксида алюминия соответственно. Об этом свидетельствует положение стопора при автоматической разливке (рисунок 5).

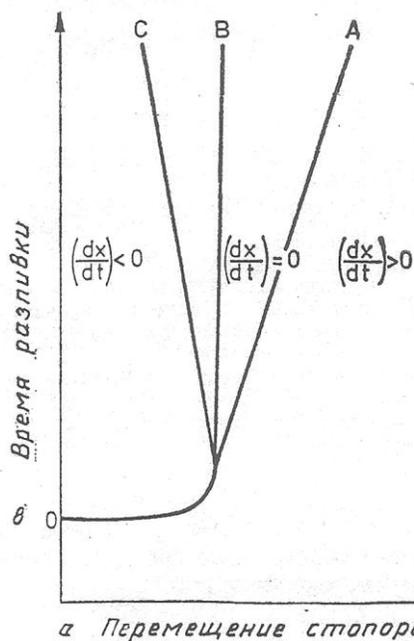


Рисунок 5. Изменение положения стопора при разливке стали, раскисленной алюминием с и без обработки кальцием; объем стали постоянен во времени: А – сталь, содержащая кристаллы оксида алюминия; В – сталь, содержащая продукты раскисления ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), содержание $\text{Ca}_{\text{мет}} = 0$; С – то же, содержание $\text{Ca}_{\text{мет}} > 0$; а – стопор закрыт; б – стопор открыт; в – старт

Повышенное количество присадок кальция приводит к износу футеровочного материала и закрытию ручья (см. рисунок 5, кривая С), тогда как

слишком малая присадка характеризуется наличием включений Al_2O_3 в металле и затягиванием стакана – стопор стремится к открытию (см. рисунок 5, кривая А). При присадке оптимального количества кальция перемещение стопора соответствует кривой В.

Аналогичные данные получили авторы статьи [19]. Данные зависимости положения стопора, уровня металла и скорости разливки при недостаточном (а) и избыточном (б) содержании кальция представлены на рисунке 6.

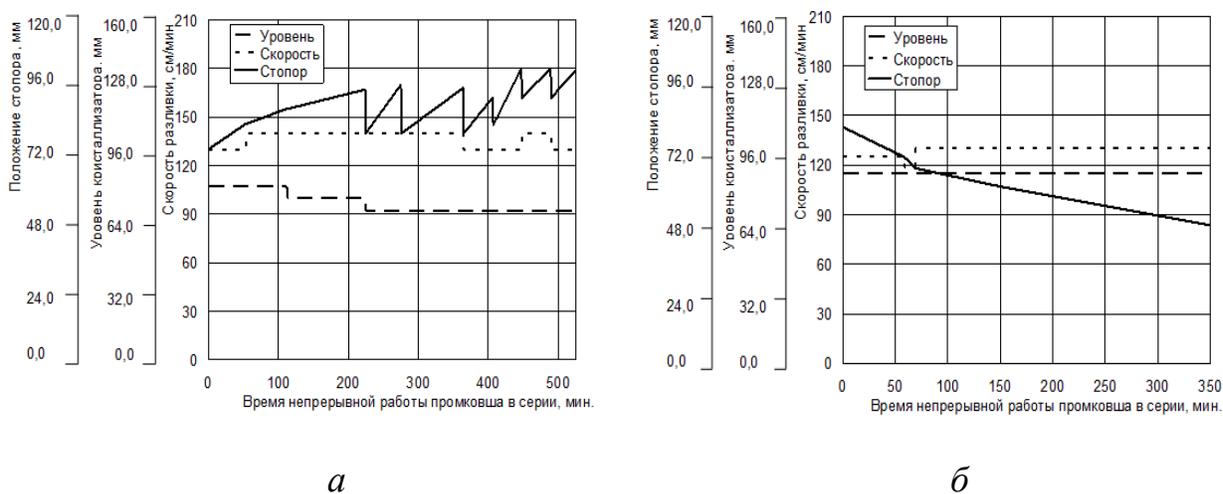


Рисунок 6. Диаграмма положения стопора, уровня металла в кристаллизаторе и скорости разливки при недостаточном (а) и избыточном (б) содержании кальция в металле

Как видно из рисунка 6, при недостаточном содержании кальция в металле (а) положение стопора постоянно изменяется, что негативно сказывается на уровне металла в кристаллизаторе и скорости разливки. При избыточном содержании кальция не наблюдается сильного изменения скорости разливки и положения уровня металла, однако уровень стопора в течение всей серии снижается. Можно сказать, что недостаточная присадка кальция более пагубно влияет на показатели разливки, чем переизбыток кальция в металле.

Л.М. Аксельродом и др. [20] был изучен фазовый состав отложений на внутренних стенках разливочных корундографитовых стаканов при разливке сталей Ст3 и 17ГС.

В работе [21] определено, что причина образования крупных неметаллических включений лежит в отложениях на внутренней стороне стакана (или трубы).

Возникновение поверхностных дефектов тесно связано с процессом зарастания стакана отложениями неметаллических включений. Исследование характеристик слябов с дефектами приводит к зависимости между зарастанием стакана-дозатора промежуточного ковша и погружной защитной трубы глиноземистыми частицами и соответствующим возникновением поверхностных и внутренних дефектов слябов и, в дальнейшем, проката.

При производстве трубного металла формирование уровня отсортировки металла также определено качеством исходной заготовки. Неметаллические включения в заготовке приводят к повышенному ремонту труб и дополнительному переделу.

При этом процент отсортировки по поверхностным дефектам в большинстве случаев сопоставим с процентом отсортировки по ультразвуковому контролю (УЗК) [22–26]. Это определяется технологическими приемами при рафинировании стали в печи-ковше и наличием элементов, имеющих высокое сродство к кислороду (Al, Ca, Mg), таблица 1 [27].

Таблица 1. Фазовый состав фаз в отложениях на внутренних стенках корундо-графитовых разливочных стаканов

«Рыхлый» слой	Промежуточный слой	«Плотный» слой
$\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	Al_2O_3 (вторичный)	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	Al_2O_3 (вторичный)
$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	Металл
$\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Металл	

При падении температуры металла в зоне контакта со стенкой стакана константа раскисления алюминием снижается приблизительно с 10^{-9} до $10^{-13} \dots 10^{-14}$. При этом в основном будут образовываться частицы корунда (Al_2O_3), рисунок 7 [81].

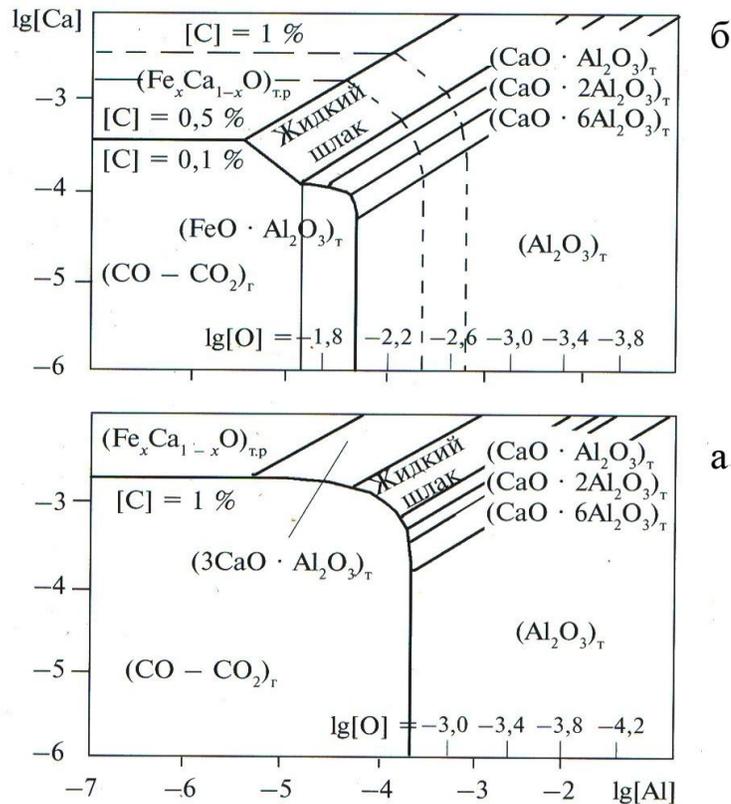


Рисунок 7. ПРКМ системы Fe – C – O – Al – Ca:
а – при $t = 1550^\circ\text{C}$; б – при $t = 1500^\circ\text{C}$

Необходимо отметить, что в процессе разливки на границе «стенка стакана – металл» в результате химической реакции между материалом стакана и жидкой сталью, а иногда из-за проникновения воздуха, вблизи межфазной поверхности создается градиент концентрации [C], [S], [O] и других элементов. Он инициирует градиент поверхностного натяжения частиц глинозема, между включениями и металлом, и под действием этого градиента включения перемещаются и притягиваются к межфазной поверхности стакан–металл. Эффект экспериментально подтвержден в лабораторных и промышленных условиях: при уменьшении градиента концентрации серы у межфазной поверхности огнеупор–сталь, вследствие более слабого эффекта притягивания глиноземистых частиц под действием градиента поверхностного натяжения, получено существенное снижение зарастаний стаканов, рисунок 8 [28].

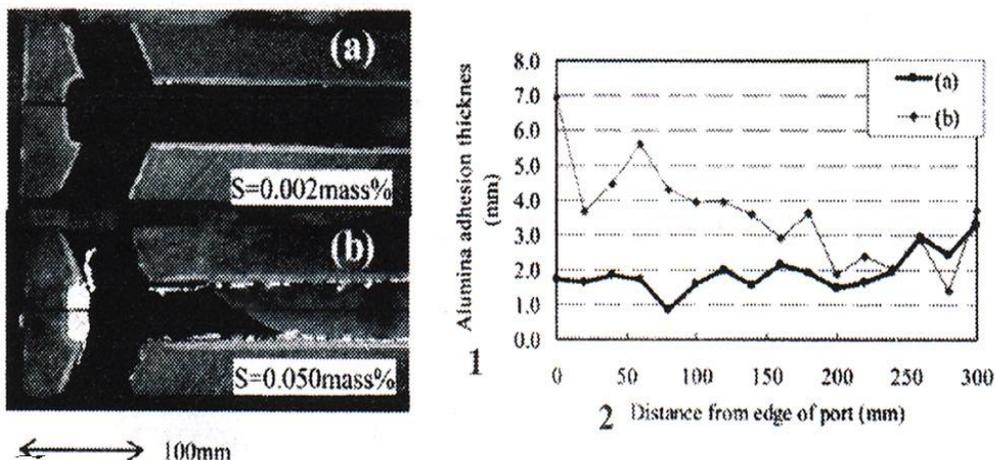


Рисунок 8. Адгезия включений на стенках стакана при разливке:
a – низкосернистой ($[S] = 0,002 \%$) и *б* – высокосернистой ($[S] = 0,050 \%$) сталей

Ранее это явление было отмечено в работе В.А. Григоряна с сотрудниками [29]. Применение в огнеупорных материалах борнитридных добавок, снижающих

смачиваемость (адгезию) их сталью, способствует ослаблению явления зарастания [30].

При десульфурации высокоизвестковыми магнийсодержащими шлаками в ковше раскисленной алюминием стали, создаются условия для восстановления кальция и магния, и практически всегда идет повышение их концентрации в стали (до $3 \cdot 10^{-3}$ % кальция и до $(4 \dots 9) \cdot 10^{-4}$ % магния) [31].

Исследование наслоений внутри погружных стаканов показал [32], что они состоят не только из Al_2O_3 (что ожидаемо), но зачастую и большое количество оксидов кальция, кобальта и железа, которые присутствуют в шлаке промковшей и ШОС кристаллизаторов. При этом отмечается уменьшение степени зарастания стаканов с повышением температуры разливки, что может быть свидетельством изменений и параметров реакций, протекающих на границе «металл – огнеупор».

В раскисленных Mn–Si сталях встречается тип отложений в виде стекловидного слоя. Он образован, по большей части, силикатами марганца с переменной долей Al_2O_3 и CaO. После нескольких плавов из-за этих отложений были закрыты ручки [33].

Отложения второго типа имели кораллоподобную форму и образованы силикатами Ca, Al, Si и имеют следовое содержание MgO, MnO_2 , Na_2O и K_2O . Эти шлаковые отложения в кристаллизаторе могут иметь место, по мнению авторов [33], в результате намораживания шлака на стакан в результате больших изменений уровня жидкой стали. Отложения третьего типа толщиной 1...3 мм встречаются наиболее часто и образованы алюминатами кальция с включениями оксидов магния и кремния. В таблице 2 отражен состав этих трех типов отложений.

Таблица 2. Состав трехтипов отложений в погружных стаканах

Тип отложений	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Прочие
Тип I	1...6	10...15	50...60	7...9	10...20	–
Тип II	2...4	15...30	35...45	25...35	1...3	Na ₂ O; K ₂ O
Тип III	1...10	50...85	1...5	10...35	0...2	–

Состав отложений в погружных стаканах на других предприятиях приведен в таблице 3 [30].

Таблица 3. Химический состав материала отложений

Компоненты	Содержание, мас. %
Al ₂ O ₃	57,24
Fe ₂ O ₃	17,9
CaO	4,99
SiO ₂	3,69
MgO	Следы

Следует подчеркнуть, что в наслоениях на внутренних стенках погружных стаканов имеются агломерации пластинчатого корунда гексаллюминатов кальция, зачастую вместе магнезиальной шпинелью и с включениями капель металла или даже с настылями (см. таблицу 1) [27].

Каждое из этих отложений имеет шанс отделиться от поверхности разливочного стакана, попасть в кристаллизатор и спровоцировать образование дефектов непрерывнолитой заготовки.

Были проведены комплексные исследования отложений на стенках погружных стаканов после разливки стали, полученной из дуговой электропечи с двухшлаковой внепечной обработкой. Проводилось изучение химического состава,

петрографии фаз и рентгеноструктурный анализ [2]. Все это показало присутствие в отложениях в основном Al_2O_3 (62...67 %); CaO (12,5 %); MgO (9...11 %). Также обнаружены корольки металла и небольшое количество SiO_2 (до 3 %). Фазовый состав отложений в основном представлен Al_2O_3 , $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и иногда CaS [3].

Ряд исследователей [24, 34–36] полагают, что основной причиной забивания элементов металлопроводки является отложение твердых корундовых частиц и частиц сульфида кальция. Химический состав отложений аналогичен приведенному в таблице 3.

Как отмечает большинство исследователей [37], отложения в разливочных стаканах образованы, по большей части, оксидами алюминия и железа (таблица 4).

Таблица 4. Химический состав отложений в стакане (мас. %)

SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO
0,77...11,6	54,2...11,9	25,3...78,7	0,42...2,93	0,37...6,03

Одним из известных способов предупреждения зарастания металлопроводки зарекомендовало себя модифицирование неметаллических включений кальцием. Это позволяет получать в стали алюминаты с пониженной точкой плавления. При модифицировании включений кальцием в стали перед разливкой необходимо [38] поддерживать соотношение $[\text{Ca}]/[\text{Al}] \geq 0,085...0,15$, при $0,7 \leq [\text{Ca}]/[\text{O}] \leq 1,0$.

Образование сульфида кальция с высокой температурой плавления требует аккуратного и дозированного введения кальция в сталь [39].

Как правило, модифицирование кальцием приводит к образованию включений из алюминатов кальция и магния типа $\text{MgO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (ввиду его восстановления из шлака и футеровки), $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$. Ниже представлены точки плавления преобладающих алюминатов кальция (таблица 5) [39].

Таблица 5. Температуры плавления преобладающих алюминатов кальция

Алюминат кальция	$12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$
Содержание Al_2O_3 , %	≈51	38	64	≈78,5	92
Температура плавления $t_{\text{пл}}$, °С	≈1420 Конгру-энтно плавится	1539 Инконгру-энтно плавится	1600 Конгру-энтно плавится	1780 Инконгру-энтно плавится	1900 Конгру-энтно плавится

При изучении отложений в работе [40] выявлены корунд и алюминат состава $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ как в обычном погружном стакане, так и в «незарастающем». Но абсолютное их количество в последнем было вдвое меньше.

Другим способом решения проблемы зарастания разливочных стаканов является использование покрытий с меньшей адгезией к глинозему [41].

Адгезия неметаллических включений к огнеупору существенно зависит от их формы. Дендритная форма включений способствует налипанию включений на огнеупорный материал.

При обработке стали кальциевыми сплавами состав и форма продуктов реакции зависит от концентрации и соотношения содержания кальция, алюминия и серы, причем состав включений претерпевает изменения во времени (рисунки 9–12) [42].

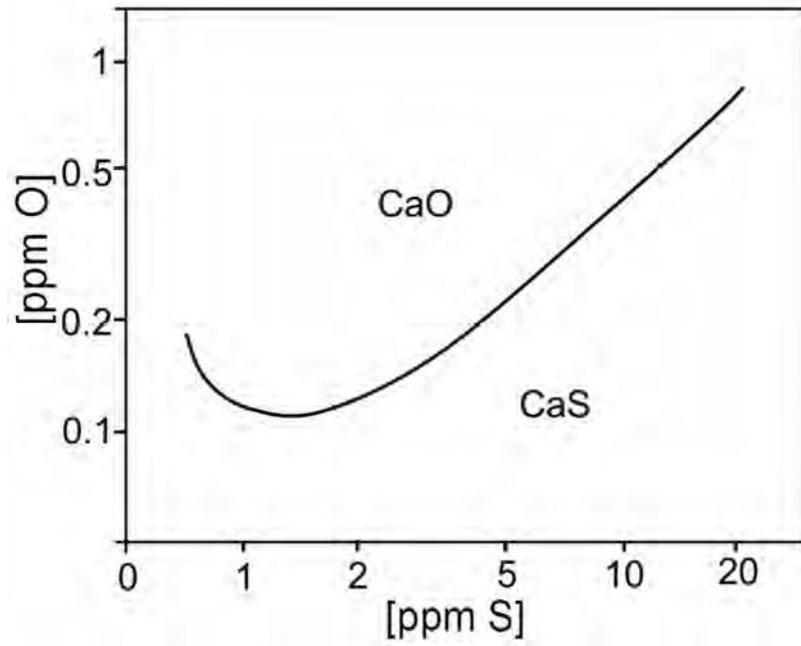


Рисунок 9. Состав преимущественной фазы неметаллических включений в сплаве Fe-Ca-O-S при 1873К

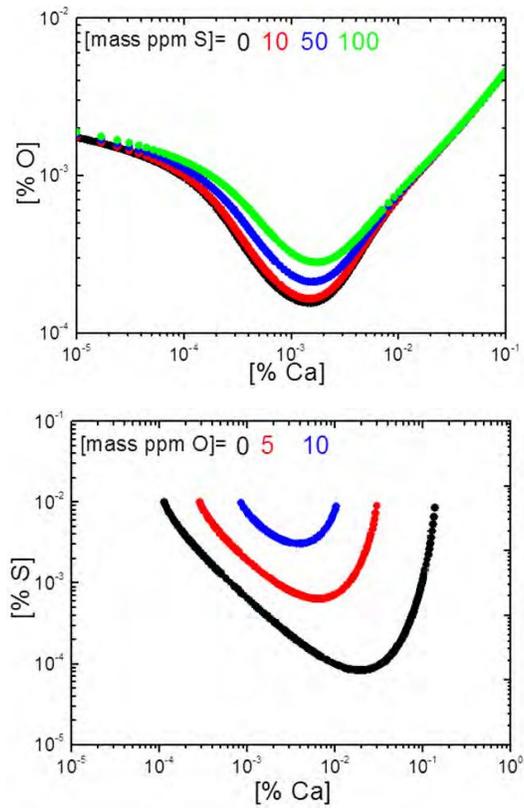


Рисунок 10. Равновесное содержание серы и кислорода в металле при $a_{CaO} = a_{CaS} = 1$ при $T = 1873$ К

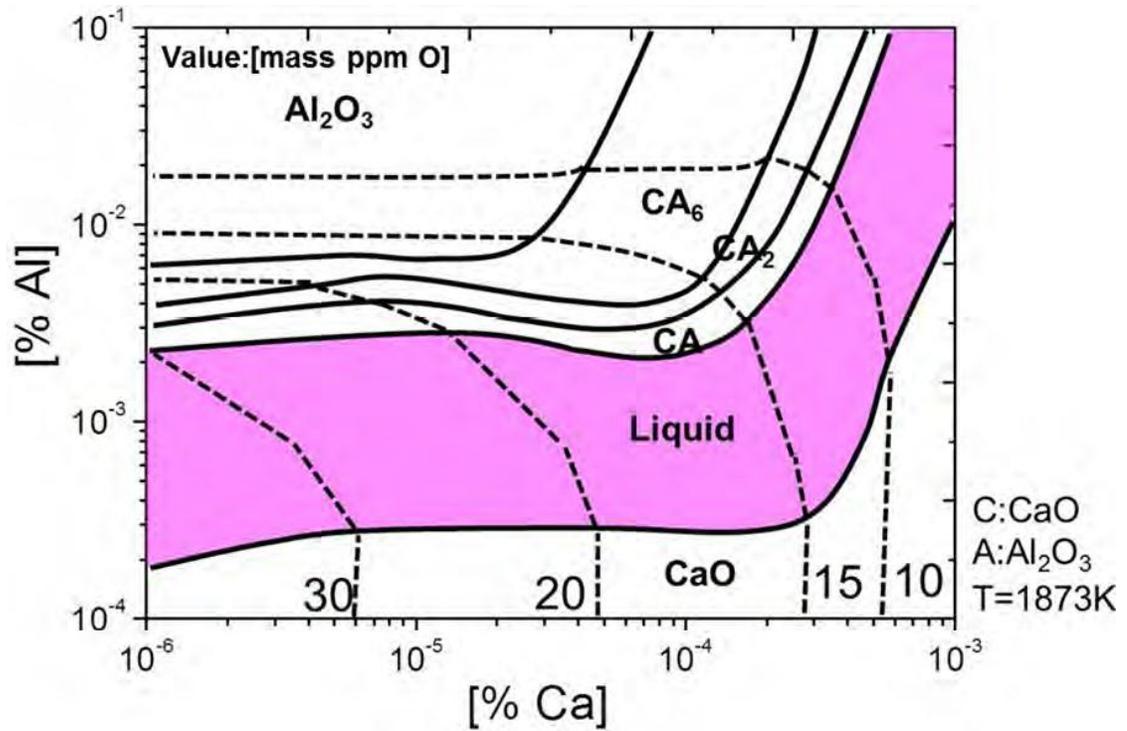


Рисунок 11. Равновесная фазовая диаграмма Ca–O–Al

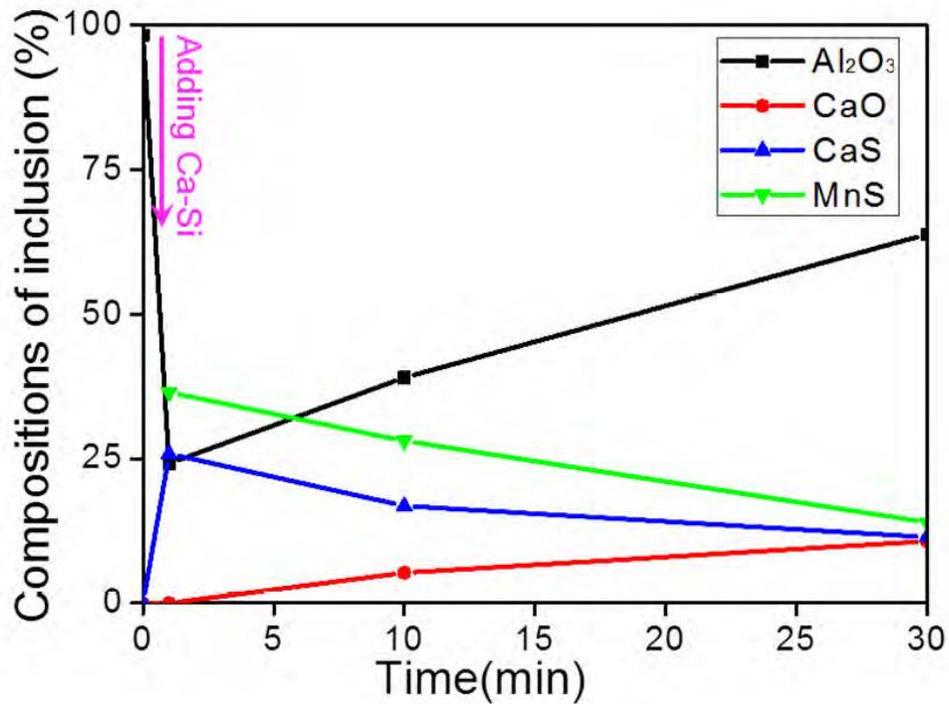


Рисунок 12. Трансформация состава включений

Анализ литературных источников по данной теме показал, что основной причиной зарастания огнеупорного разливочного стакана при разливке стали с высоким содержанием алюминия и серы является образование на его внутренней поверхности глиноземсодержащих фаз и окисульфида кальция, причем высокое содержание серы способствует этому явлению. Основным методом борьбы с этим явлением – обработка металла кальцием. Однако этого недостаточно, необходимо удалять образующиеся неметаллические включения. Для этого требуется в каждом конкретном случае определить направление изменения технологии с целью достижения максимально возможного рафинирования металла от неметаллических включений.

1.2. Роль промежуточного ковша и методы оптимизации его конструкции

Первоначально промежуточный ковш МНЛЗ играл роль только распределительного устройства, который обеспечивал достаточный запас расплава и постоянство напора металла для стабилизации процесса непрерывной разливки стали [43–47].

В последнее время контроль гидродинамических потоков металла в промежуточном ковше играет ключевую роль в технологии непрерывной разливки стали и позволяет значительно улучшить качество металла [48]. Современные промежуточные ковши оснащены дополнительными устройствами в виде сплошных и пористых перегородок, порогов, «турбостопов», а также продувкой металла аргоном через стопоры, шиберы и пористые вставки [49, 50].

Схема современной конструкции промежуточного ковша в сравнении с обычной представлена на рисунке 13.

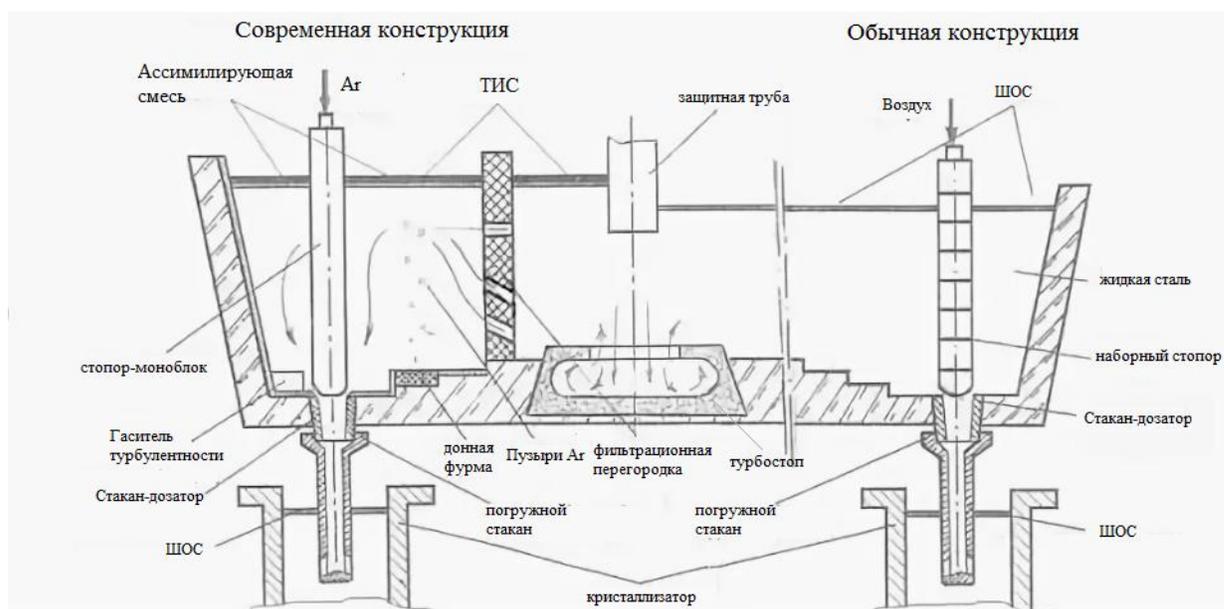


Рисунок 13. Схема промежуточного ковша современной и обычной конструкции

В зависимости от сортамента разливаемых сталей промковши условно делятся на две группы [51]:

- для вспомогательного рафинирования стали;
- для разливки длинными и сверхдлинными сериями [52].

Промковши, в которых проводится рафинирование металла, оборудованы дополнительными конструктивными элементами в виде порогов или фильтрующих перегородок (см. рисунок 13). Авторами [53] отмечается, что применение фильтрационных перегородок в сравнении с базовой технологией без перегородок позволило снизить максимальное количество включений размером 1...2 мкм примерно в 3 раза, включений размером 3...4 мкм в 2 раза и практически исключить включения размером свыше 5 мкм. В работе [54] также показана эффективность промежуточного ковша с полнопрофильными перегородками. Применение перегородок привело к снижению загрязненности включениями всех типов (в особенности диаметром более 20 мкм) в 1,8–2,2 раза.

В совокупности с продувкой аргоном через пористые или каналные блоки эффективность очистки расплава металла от неметаллических включений увеличивается вследствие столкновения, коалесценции и флотации включений, захвата включений широкого спектра размеров пузырьками при движении рециркуляционных потоков металла в продольном направлении [55–60]. Однако чрезмерная подача аргона в промежуточном ковше может привести к турбулентным потокам в верхних слоях металла, захвату ассимилирующего шлака, оголению металла и, как следствие, его вторичному окислению. При оптимальном расходе инертного газа повышение чистоты стали гарантировано [61]. Так, в работе [62] применение перегородок промежуточных ковшей с обработкой стали аргоном позволило снизить отсортировку слябовых заготовок по точечной неоднородности на 0,0003 %, по шлаковым включениям на 0,020 %. Брак слябовых заготовок по «грубым» шлаковым включениям снизился до 0,0032 %. В целом авторы [55] утверждают, что применение продувочных блоков в промежуточном ковше способствует всплытию крупных неметаллических включений (до 30...50 %).

Для снижения издержек производства разливку стали на промежуточных ковшах осуществляют сверхдлинными сериями. Основным требованием к таким ковшам является повышенный ресурс футеровки. В основном на этих ковшах разливается рядовой металл, поэтому необходимость в установке дополнительных конструкций для удаления неметаллических включений экономически нецелесообразна. Для увеличения времени пребывания металла в промежуточном ковше на его дне устанавливается специальное огнеупорное изделие – «турбостоп» [63].

На рисунке 14 схематично представлен принцип действия турбостопа и представлены основные потоки металла в промковше с его использованием.

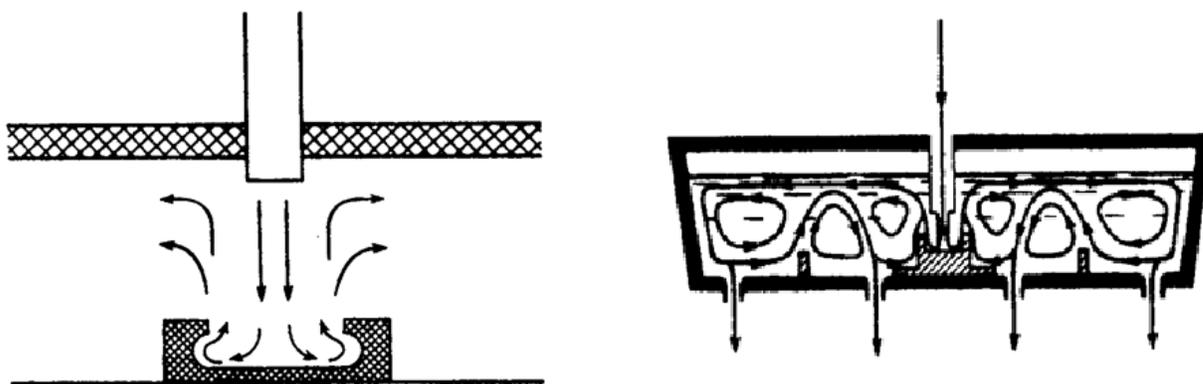


Рисунок 14. Турбостоп и схема распределения потоков в промковше

Оптимальный объем промковша определяется исходя из технологических и технических параметров разливки.

Температура металла в промежуточном ковше также оказывает значительное влияние на удаление неметаллических включений [64]. Как показано в этой работе, для обеспечения максимального снижения содержания неметаллических включений должна быть подобрана оптимальная температура перегрева металла. Для поддержания оптимальной температуры применяется технология подогрева металла в промежуточном ковше, или осуществляется защита металла теплоизолирующими смесями. Несмотря на то, что в настоящее время в мире используются 15 установок нагрева и поддержания температуры стали в промежуточных ковшах [65], их применение ограничено из-за сложности размещения оборудования на рабочей площадке и интеграции в технологию действующих МНЛЗ. Поэтому поддержание температуры в промежуточном ковше осуществляют отдачей на поверхность металла теплоизолирующих смесей. Перепад температуры стали в промковше по ходу одной плавки не должен превышать 4...5 °С [66].

Наибольшее распространение получила технология «двухслойного» шлака, заключающаяся в отдаче ассимилирующей смеси при наполнении промежуточного ковша металлом и последующей отдаче теплоизолирующей смеси. Ассимилирующая смесь также играет важную роль в получении чистой стали. Такие смеси препятствуют вторичному окислению металла и ассимилируют всплывающие продукты раскисления [67].

Эффективность применения ассимилирующих смесей зависит от различных параметров [6, 68]:

1. Химического состава шлака;
2. Вязкости шлакового расплава;
3. Значения поверхностного натяжения;
4. Толщины жидкой прослойки шлака;
5. Характера массопереноса в промежуточном ковше.

Таким образом, для получения чистой от неметаллических включений стали в промежуточном ковше необходимо решить следующие задачи:

- устранить контакт жидкого металла с кислородом воздуха, эрозию футеровки и обеспечить надежную и своевременную отсечку шлака сталеразливочного ковша;

- обеспечить оптимальную циркуляцию стали в промковше, увеличив время ее пребывания в нем, уменьшить количество «мертвых» зон и т.п.;

- усовершенствовать технологию подачи металла в промежуточный ковш и осуществлять контроль уровня металла и шлака [69, 70].

- использовать ассимилирующую шлакообразующую смесь с оптимальными физико-химическими свойствами.

Провести такую комплексную работу невозможно в промышленных условиях, поэтому в практике применяются различные методы исследования –

физическое и математическое моделирование [71, 72]. Такое моделирование позволяет:

- рассчитать величины скоростей металла под действием свободной и вынужденной конвекции;
- исследовать перемещение включений в полях скоростей потоков металла и влияние на эти процессы характеристических размеров емкостей;
- изучить воздействие типа подвода жидкой стали и конструктивных особенностей промковша на распределение металла и шлака;
- провести проектирование конструктивных параметров и прогнозирование технологических решений, минимизирующих капитальные затраты при модернизации оборудования.

Для проведения адекватного физического моделирования нужно соблюдение условий, вытекающих из 3-й теоремы подобия:

- подобие соответствующих геометрических параметров;
- описание процессов, происходящих в оригинале и в модели одними дифференциальными уравнениями, т.е. относящимися к одному классу физических явлений;
- подобие для краевых условий;
- идентичность определяющих чисел подобия.

С целью изучения распределения гидравлических потоков применяют различные инструменты определения скорости: лазерный анемометр (измеритель скорости), электромагнитный измеритель [73, 74], метод трассировки цветными жидкостями [75], трубки Пито-Прандтля [76].

Необходимо подчеркнуть, что прямое применение литературных данных к конкретным промышленным объектам невозможно, в связи с чем необходима их адаптация и проведение собственных лабораторных и промышленных исследований.

Таким образом, на основании анализа состояния вопроса, можно сделать вывод о необходимости проведения следующих исследований:

1. Исследование механизма образования и состава неметаллических включений при внепечной обработке стали С45Е и определение возможности ее изменения с целью снижения их количества;
2. Изучение изменения параметров покровного шлака в процессе серийной разливки, поиск путей сохранения его ассимилирующих свойств на протяжении всей серии плавов и разработка новых шлаковых композиций с целью повышения их ассимилирующей способности.
3. Исследование гидродинамики металла в промежуточном ковше и разработка технических решений, способствующих улучшению всплывания неметаллических включений и захвата их покровным шлаком.

Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При выполнении работы все исследования соответствуют действующим аттестованным методикам. Приборы, использованные в проводимых исследованиях, прошли поверку. Изучение физических свойств и химического состава шлакообразующих смесей осуществлено в аккредитованных лабораториях. Вышесказанное подтверждает достоверность полученных результатов измерений.

2.1. Проведение металлографических исследований

Изучение микроструктуры и определение фазового состава проводилось на комплексе MLA System Quanta 650 фирмы FEI Company.

В состав комплекса входят:

- электронный сканирующий микроскоп SEM Quanta.
- энергодисперсионный детектор EDAX Silicon Drift Detectors.
- интегрированное программное обеспечение MLA Suite.

Исследования на микрорентгеноспектральном микроскопе проводили на шлифах размером 30 мм. Пробы металла были залиты быстротвердеющим полимером под вакуумом на импрегнаторе CitoVac фирмы Struers.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре X'PERT PRO производства PANalytical

В таблице 6 представлены характеристики прибора.

Таблица 6. Характеристики дифрактометра X'PERT PRO

Наименование характеристики	Значение
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении угловых положений дифракционных максимумов, градус	$\pm 0,02$
Среднеквадратичное отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности при измерении угловых положений дифракционных максимумов, градус	0,0002
Относительное СКО выходного сигнала, %, не более	1,0

Исследование проводили по методическим указаниям НСАМ № 21 «Рентгенографический количественный фазовый анализ (РКФА) с использованием метода внутреннего стандарта».

2.2 Анализ химического состава металла

Отбор ковшовых проб металла и проб металла от непрерывнолитой заготовки и проката осуществляли по ГОСТ 7565–81.

Химический состав стали анализировали с помощью спектрометров нескольких типов.

Применяли:

а) рентгенофлуоресцентный спектрометр S8 EXPLORER. Мощность рентгеновской трубки 4 кВт;

б) оптический эмиссионный спектрометр SPECTROLAB с искровым источником возбуждения спектра.

в) рентгеновский спектрометр Axios mAX Advanced фирмы PANalytica с гониометром Гониометр DOPS.

2.3 Определение химического состава металлургических шлаков

Для проведения химического анализа сталеплавильных шлаков, шлаков промежуточного ковша МНЛЗ и наростов сталеразливочного стакана использовали спектрометр вакуумный Спектроскан Макс GV. Характеристики прибора приведены в таблице 7.

Таблица 7. Характеристики прибора Спектроскан Макс GV

Диапазон определяемых элементов	от ^{11}Ca до ^{94}Pu
Типы образцов	Жидкие, твердые, порошки, фильтры, пленки
Пределы обнаружения, L для легкой матрицы (экспозиция – 100 с)	Na – $1 \cdot 10^{-1} \%$, Mg, – $1 \cdot 10^{-2} \%$, Al – $1 \cdot 10^{-3} \%$, Si – $5 \cdot 10^{-4} \%$, P – $5 \cdot 10^{-4} \%$, Cd, Pb – $5 \cdot 10^{-4} \%$ S, Ti, V, Cr – $1 \cdot 10^{-4} \%$, Co, Ni – $5 \cdot 10^{-5} \%$
Диапазон определяемых содержаний без специальной пробоподготовки со специальной пробоподготовкой	от $3L$ до 100 % от $0,005L$
Способ выделения линий спектра	Дифракция на кристалле
Время количественного анализа пробы	От 3 мин
Время одного элементопределения	От 10 до 100 с
Рентгенооптическая схема	По Иоганссону
Энергетическое разрешение	9 эВ (Si Ka), 60 эВ (Fe Ka)
Собственная аппаратурная погрешность	0,5 %
Напряжение на аноде рентгеновской трубки (max)	50 кВ
Кристалл-анализаторы по Иогану и Иогансону	LiF(200), C, PET, KAP, ML (44E)

Диапазон определяемых элементов	от ^{11}Ca до ^{94}Pu
Пробозагрузочное устройство	Автоматическое на 10 образцов с вращением, диаметром до 40 мм
Габаритные размеры и масса: спектрометрический блок блок высоковольтного источника питания блок вакуумного насоса	550×450×450 мм; 70 кг 240×440×450 мм; 30 кг 130×200×320 мм; 15 кг
Питание Потребляемая мощность от сети 220 В	~220 В, 50 Гц, ~ 380 В 850 Вт
Интерфейс с ЭВМ	RS-232

2.4 Измерение температуры

Температуру жидкой стали и окисленность стали (активность растворенного кислорода) измеряли прибором Multi-Lab III Celox.

Типы термопар по ГОСТ Р8.585–2001 и диапазоны измерения:
от 600 до 1820 °С.

2.5. Методики определения физических свойств шлаковых расплавов

Температурный интервал плавления шлаковых расплавов измеряли с помощью высокотемпературного микроскопа EM 201 (фирмы Hesse, Германия). Фотография прибора представлена на рисунке 15.

Диапазон измерений вязкости – 0,20...1,50 Па·с. Фотография прибора представлена на рисунке 16.

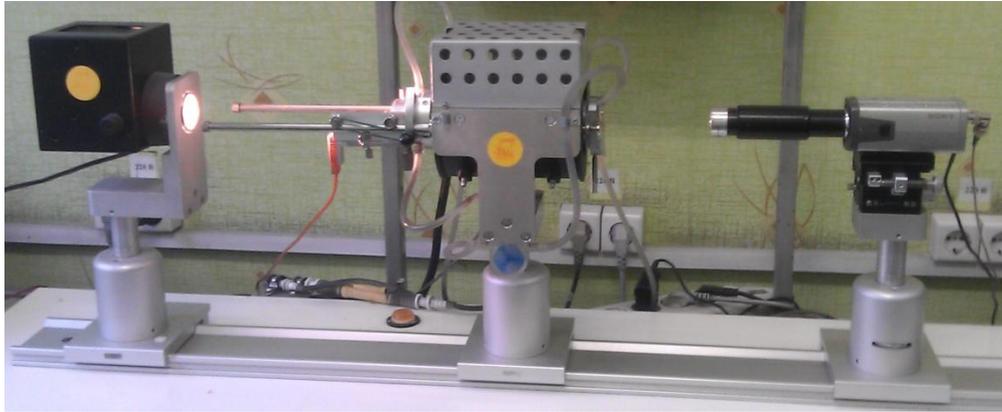


Рисунок 15. Высокотемпературный микроскоп EM 201



Рисунок 16. Ротационный вискозиметр VIS 403

Глава 3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ С НОРМИРУЕМЫМ НИЖНИМ ПРЕДЕЛОМ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ И СЕРЫ

Плавка стали типа С45Е осуществляется в 150-т дуговой печи с газокислородными горелками. Шихтовка – три корзины стального лома с подачей свежееобожженной извести через свод. По достижении температуры ванны 1530...1560 °С начинается интенсивная продувка металла кислородом (окислительный период). После достижения температуры металла 1570...1600 °С скачивается окислительный шлак. Металл через эркерное выпускное отверстие выпускается в предварительно разогретый ковш. Содержание углерода перед выпуском из печи – не менее 0,07 %. Уровень активности кислорода – не более 800 ppm. При выпуске в ковш присаживают: 150...200 кг брикетированных алюминиевых отходов; 200...250 кг карбида кремния; ферросплавы и антрацит на нижний предел содержания элементов в марке (С 0,45 %, Мп 0,65 %, Сг 0,1 %, Тi 0,008 %); известь 800...1000 кг; алюмокорундовую смесь ММКН-75 (Al_2O_3 не менее 75 %, SiO_2 не более 6,0 % Cr_2O_3 не более 4,0 %, TiO_2 не более 2,0 %) в количестве 250...350 кг.

Внепечная обработка проводится на двух установках ковш-печь последовательно с непрерывным перемешиванием металла аргоном. После отдачи требуемого для корректировки химического состава количества ферросплавов и 200...400 кг извести проводится порционная добавка песка (порция до 50 кг) для поддержания содержания серы в металле на уровне 0,02...0,025 %. Суммарное количество песка 250...300 кг. Содержание алюминия в металле в процессе обработки поддерживается в пределах 0,015...0,022 %. Содержание алюминия перед подачей ковша на вакуумную установку – в пределах 0,010...0,015 % выше нижнего предела марочного содержания.

Перед установкой ковша в вакуумную камеру проводится слив излишнего шлака в шлаковую чашу до достижения толщины слоя шлака менее 50 мм, присаживается серосодержащая проволока из расчета превышения содержания серы на 0,003 % над нижним пределом марки.

Перед вакуумной обработкой в ковш присаживают 30...35 кг гранулированного алюминия. Проводится вакуумная обработка до достижения требуемой для отдачи на МНЛЗ температуры металла. После окончания вакуумирования присаживается алюминиевая катанка, проводится усреднительная продувка аргоном в течение 3...5 мин. Вводится кальцийсодержащая проволока и в течение 5...10 мин проводится усреднительная продувка. При этом может вводиться серосодержащая проволока. После присадки серы усреднительная продувка не менее 3...4 мин. Для получения качественной макроструктуры непрерывнолитой заготовки содержание серы перед разливкой не должно превышать 0,005 % (по стандарту нижний предел содержания в марке (0,020...0,025 %)), содержание углерода 0,44...0,46 %. На шлак подается теплоизолирующая смесь – рисовая лузга. Время до начала разливки не должно превышать 20 мин.

Металл разливают на МНЛЗ через промежуточный ковш, футерованный торкрет-массой на основе MgO. На поверхность металла в промежуточном ковше подавали теплоизолирующую шлакообразующую смесь марки П-4.

При работе по приведенной выше технологии наблюдались проблемы с серийностью разливки стали из-за зарастания огнеупорных погружных стаканов. Применение технологии подачи аргона в стаканы-дозаторы с расходом 0,5...1,0 л/мин с повышением до 3,0 л/мин при их зарастании не привело к положительному эффекту. Во время серийной разливки в промежуточном ковше наблюдалось ухудшение свойств покровного шлака от плавки к плавке. Таким

образом, для разработки технологии, обеспечивающей стабильную разливку, необходимо было провести ряд исследований:

1. Изучить причины зарастания погружных стаканов при разливке стали в условиях АО «ВТЗ».

2. Проанализировать шлаковый режим в процессе непрерывной разливки и определить причины ухудшения свойств покровного шлака.

3.1 Термодинамическая оценка возможности образования оксидной и сульфидной фаз при обработке металла кальцием

В соответствии с действующей в АО «ВТЗ» технологией завершающей операцией внепечной обработки стали С45Е перед разливкой является модифицирование кальцием оксидных включений после вакуумной обработки. При этом для корректировки содержания серы может вводиться серосодержащая проволока. Анализ литературных данных показал, что затягивание погружного стакана в процессе непрерывной разливки обусловлено, прежде всего, наличием в металле неметаллической фазы неблагоприятной морфологии [83–86]. Учитывая, что обработка расплава кальцием модифицирует оксидные включения и тем самым улучшает разливаемость, можно предположить, что затягивание связано с наличием сульфидных включений. Эти включения должны формироваться на заключительных стадиях внепечной обработки перед непрерывной разливкой стали, так как сульфиды, образовавшиеся на более ранних этапах технологического процесса, достаточно эффективно удаляются из расплава при обработке на установках ковш-печь и при вакуумировании стали.

Если образование сульфидов происходит при обработке металла кальцием, то необходимо провести термодинамическую оценку возможности такого процесса. Для этого была построена термодинамическая модель изменения

содержания кислорода, кальция и серы в результате присадок кальция. Расчет проводили для расплава следующего химического состава (среднее содержание базовых элементов в стали С45Е): С 0,47 %; Мп 0,75%; Si 0,28 %. Концентрацию алюминия и серы изменяли внутри марочного интервала: Al 0,02...0,05 %; S 0,020...0,035 %. Исходную концентрацию кальция считали соответствующей действующей технологии – 0,015 %.

Равновесные концентрации кальция, серы и кислорода описываются системой балансовых и равновесных уравнений:

$$[Ca]_p = [Ca]_h - \Delta[Ca]_O - [Ca]_S;$$

$$[S]_p = [S]_h - \Delta[S]_{Ca};$$

$$[O]_p = [O]_h - \Delta[O]_{Ca};$$

$$[Ca]_p = \frac{K_{Ca-O}}{f_{Ca} f_O [O]_p};$$

$$[Ca]_p = \frac{K_{Ca-S}}{f_{Ca} f_S [S]_p};$$

$$\Delta[Ca]_O / \Delta[O]_{Ca} = A_{Ca} / A_O;$$

$$\Delta[Ca]_S / \Delta[S]_{Ca} = A_{Ca} / A_S,$$

где $[Ca]_p$, $[S]_p$, $[O]_p$ – равновесное содержание кальция, серы и кислорода (после обработки расплава кальцием), %;

$[Ca]_h$, $[S]_h$, $[O]_h$ – начальное содержание кальция, серы и кислорода (до обработки расплава кальцием), %;

$\Delta[Ca]_O$ – количество кальция, вступившего во взаимодействие с кислородом, %;

$\Delta[Ca]_S$ – количество кальция, вступившего во взаимодействие с серой, %;

$\Delta[O]_{Ca}$ – количество кислорода, вступившего во взаимодействие с кальцием, %;

$\Delta[S]_{Ca}$ – количество серы, вступившей во взаимодействие с кальцием, %;

K_{Ca-O} – константа равновесия реакции $[Ca] + [O] = CaO$ (по данным авторов [78], при $t = 1600$ °C $K_{Ca-O} = 1,1 \cdot 10^{-6}$);

K_{Ca-S} – константа равновесия реакции $[Ca] + [S] = CaS$ (по данным авторов [79], при $t = 1600$ °C $K_{Ca-S} = 3,8 \cdot 10^{-5}$);

f_{Ca}, f_O, f_S – коэффициенты активности кальция, кислорода и серы соответственно.

Коэффициенты активности кальция, кислорода и серы определяли из следующих выражений, ограничиваясь параметрами взаимодействия первого порядка:

$$\lg f_{Ca} = e_{Ca}^{Ca}[Ca]_p + e_{Ca}^O[O]_p + e_{Ca}^S[S]_p + \sum_i e_{Ca}^i [i],$$

$$\lg f_O = e_O^O[O]_p + e_O^{Ca}[Ca]_p + e_O^S[S]_p + \sum_i e_O^i [i],$$

$$\lg f_S = e_S^S[S]_p + e_S^{Ca}[Ca]_p + e_S^O[O]_p + \sum_i e_S^i [i],$$

где e_j^j, e_j^i – параметры взаимодействия первого порядка;

$[i]$ – содержание углерода, марганца, кремния и алюминия, %.

Начальное содержание кислорода рассчитывали, как равновесное с алюминием для различных начальных значений содержания алюминия $[Al]_H = 0,02 \dots 0,05$ % из уравнения

$$[O]_H = \sqrt[3]{\frac{K_{Al-O}}{f_O^3 f_{Al}^2 [Al]_H^2}},$$

где f_O и f_{Al} – коэффициенты активности кислорода и алюминия, рассчитываемые, как было описано выше, на основе параметров взаимодействия первого порядка и химического состава стали С45Е;

K_{Al-O} – константа равновесия реакции $2[Al] + 3[O] = Al_2O_3$ (по данным авторов [80], при $t = 1600$ °C $K_{Al-O} = 1,1 \cdot 10^{-11}$).

На основе вышеприведенных закономерностей было рассчитано количество кальция, участвующего в образовании оксидов и сульфидов для различных исходных концентраций кислорода (алюминия) и серы. Результаты представлены на рисунках 17–20.

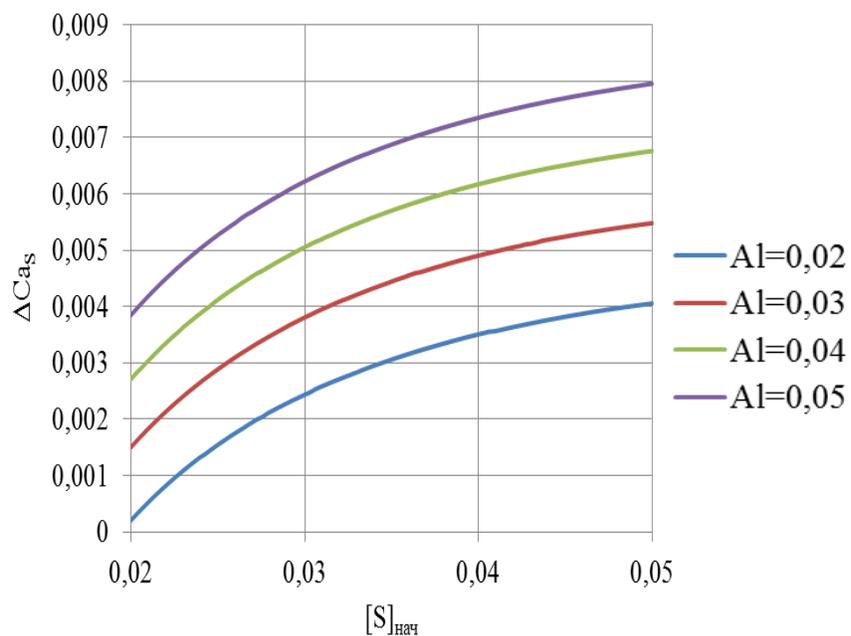


Рисунок 17. Влияние начального содержания серы на количество кальция, связываемого в сульфид, при различном начальном содержании алюминия

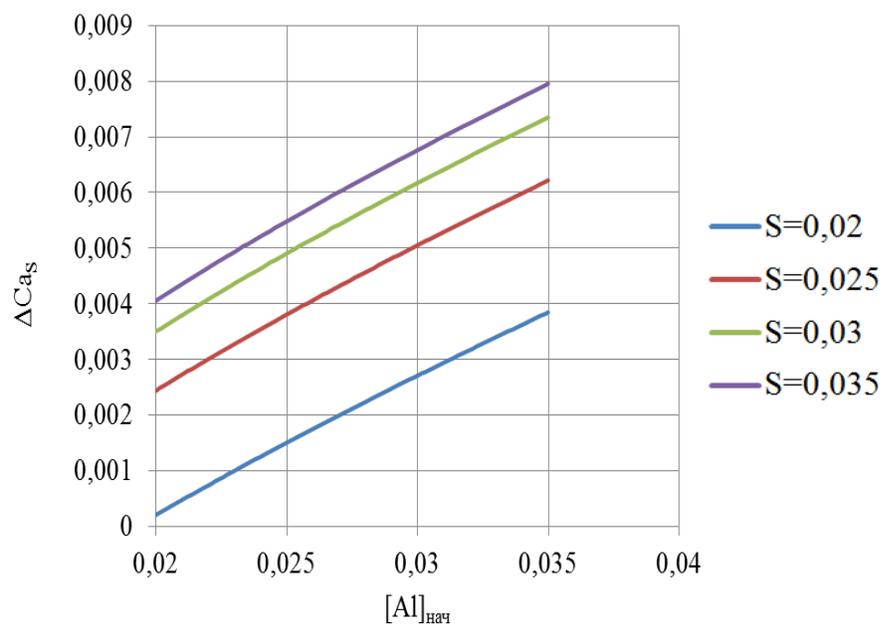


Рисунок 18. Влияние начального содержания алюминия на количество кальция, связываемого в сульфид при различном начальном содержании серы

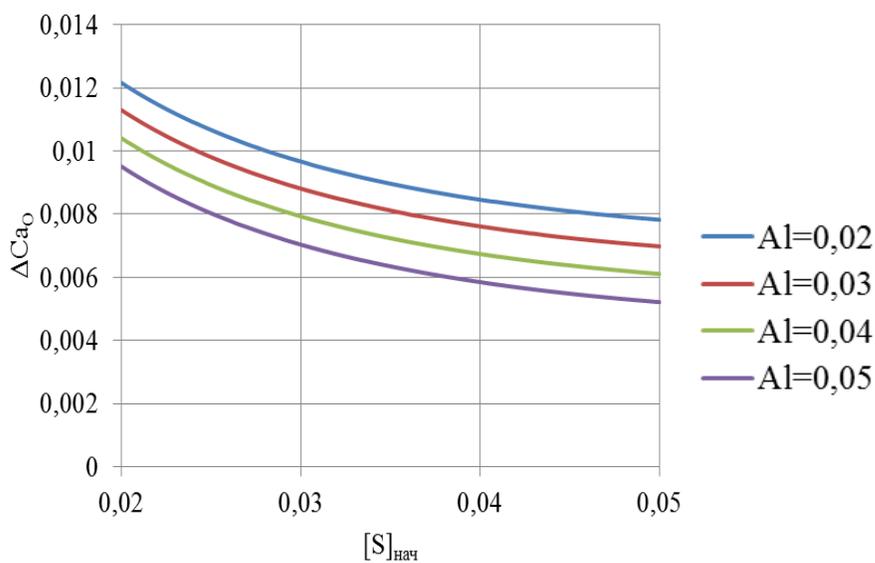


Рисунок 19. Влияние начального содержания серы на количество кальция, связываемого в оксид при различном начальном содержании алюминия

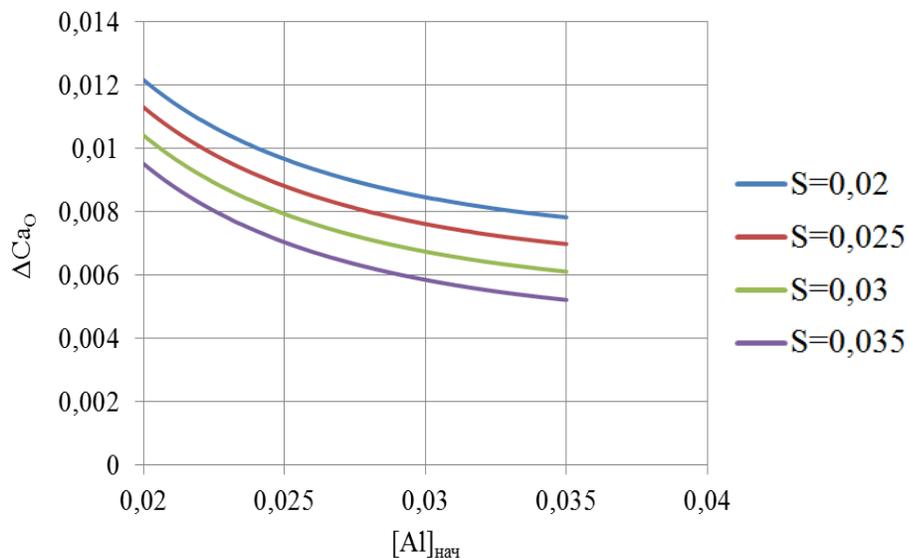


Рисунок 20. Влияние начального содержания алюминия на количество кальция, связываемого в оксид, при различном начальном содержании серы

Проведенная термодинамическая оценка возможности образования оксидной и сульфидной фаз при обработке металла кальцием показала, что во всем диапазоне содержаний серы и алюминия, регламентируемом технической документацией, после введения кальция в расплав могут образовываться не только оксиды, но и сульфиды кальция. При этом с ростом исходного содержания серы и снижением содержания кислорода (рост содержания алюминия) это соотношение меняется в сторону увеличения количества образующихся сульфидов.

Следовательно, с точки зрения снижения вероятности образования сульфидов целесообразно проводить плавку таким образом, чтобы перед обработкой металла кальцием в нем содержалось минимально допустимое количество серы и максимально допустимое количество кислорода.

3.2 Металлографические исследования

Проведение термодинамической оценки образования неметаллических фаз после обработки стали С45Е кальцием показало, что при такой обработке протекают два процесса с разным результатом:

- взаимодействие кальция с кислородом и образованием в дальнейшем алюминатов кальция, что способствует улучшению разливаемости стали;
- взаимодействие кальция с серой с образованием сульфидов кальция, что приводит к ухудшению разливаемости стали.

Для подтверждения этих выводов были проведены металлографические исследования отложений на внутренней полости погружного стакана после разливки через него стали С45Е.

Исследования проводили на комплексе MLA System Quanta 650 (см. Глава 2).

Пример результатов проведенных исследований приведен на рисунке 21.

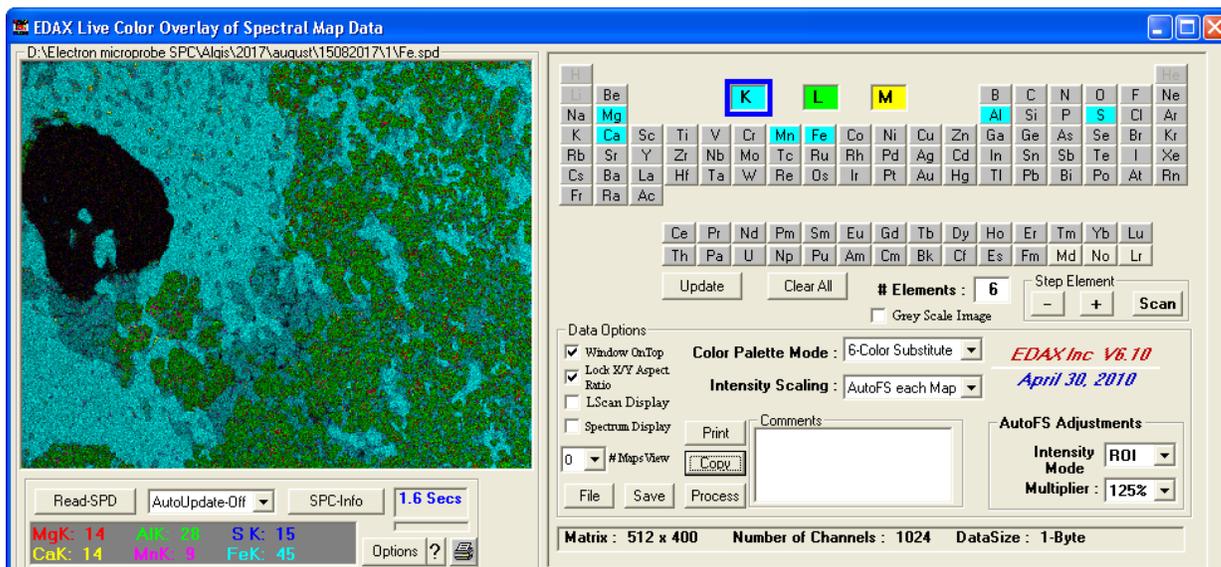
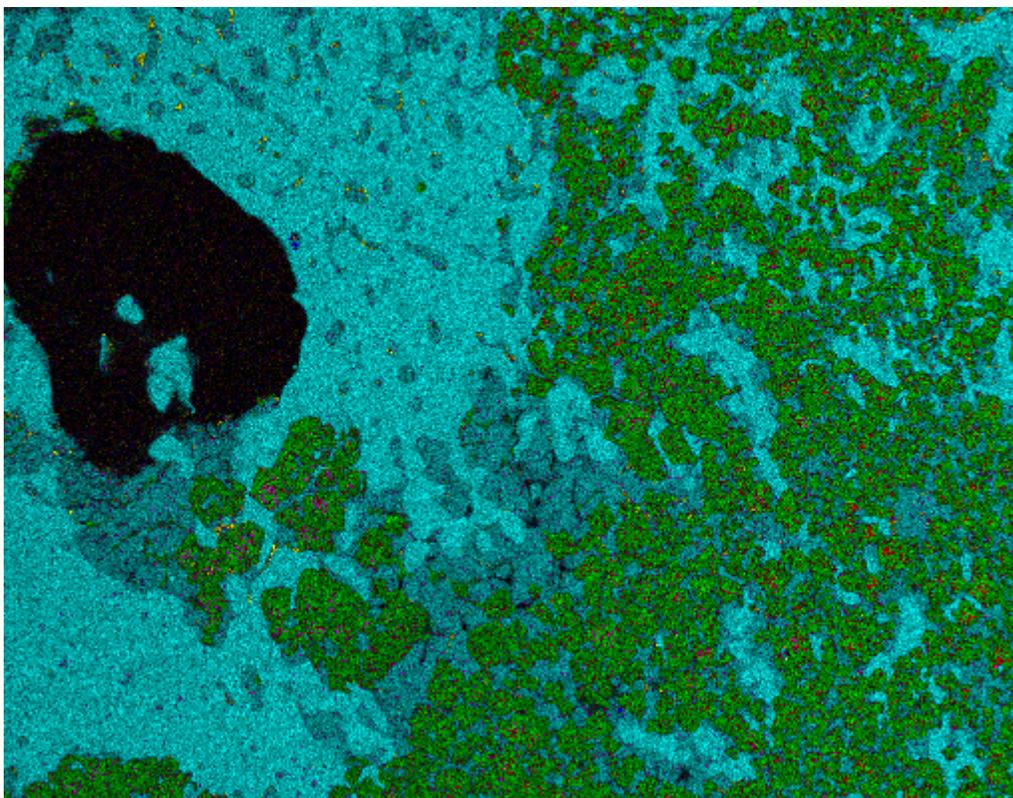


Рисунок 21. Пример результатов анализа отложений на внутренней поверхности погружного стакана после разливки стали С45Е

В результате проведенных исследований установлено, что в отложениях на внутренней поверхности погружного стакана имеют место сульфиды кальция, которые и являются основной причиной ухудшения разливаемости стали С45Е.

Поскольку образование сульфидов кальция происходит на заключительном этапе доводки металла при внепечной обработке, то снизить их содержание в процессе непрерывной разливки можно только благодаря высокой рафинирующей способности покровного шлака промежуточного ковша. Однако попадание сульфидов кальция в погружной стакан свидетельствует о том, что при действующей технологии покровные шлаки обладают низкой рафинирующей способностью. Исходя из этого, на следующем этапе исследований был осуществлен анализ шлакового режима в процессе непрерывной разливки и определены причины ухудшения свойств покровного шлака.

3.3. Изучение свойств покровного шлака в процессе серийной разливки стали

Ухудшение рафинирующей способности покровного шлака может быть связано либо со снижением его температуры, либо с изменением его химического состава в неблагоприятную область.

В процессе непрерывной разливки происходит постоянное обновление металла, что обеспечивает достаточную стабильность теплового режима разливки и не приводит к захолаживанию покровного шлака. Следовательно, основной причиной изменения свойств покровного шлака является изменение его химического состава.

На эффективность протекания процесса ассимиляции неметаллических включений в промежуточном ковше решающее влияние оказывают физико-химические свойства шлакового расплава: температура плавления, вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания и основность. Они могут изменяться в процессе разливки серии плавов под влиянием следующих факторов:

1. Обогащение шлака всплывающими включениями;
2. Эрозия и переход в шлак огнеупорной массы рабочего слоя футеровки промковша;
3. Попадание в шлак промковша шлака из сталеразливочного ковша в конце каждой плавки;
4. Попадание в промковш стартовой смеси из шиберных затворов сталеразливочных ковшей.

По данным работ [81], процессы 2 и 4 незначительно влияют на химический состав шлака в промежуточном ковше. Процесс 1 также неэффективен в условиях АО «ВТЗ», что подтверждается металлографическими исследованиями отложений в погружном стакане после разливки стали С45Е. Следовательно, определяющим

процессом является попадание шлака из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш.

Оценка материального баланса количества шлака в промежуточном ковше в процессе разливки серии плавов показала, что за одну плавку в промежуточный ковш попадает порядка 150 кг шлака из сталеразливочного ковша. С одной стороны, это объясняется затягиванием шлака из стальной ковша в образующуюся воронку при низком уровне остаточного металла в сталеразливочном ковше, а с другой стороны, с попаданием части шлака в промежуточный ковш через отверстие в шиберном затворе в конце разливки каждой плавки в серии.

Состав и свойства шлаковой смеси марки П-4, применяемой в промежуточном ковше при разливке стали С45Е, приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Химический состав ШОС и влажность марки П-4

Содержание, мас. %							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F	Влага	C	K ₂ O+ Na ₂ O
30,0...35,0	30,0...33,0	12,0...15,0	2,0...5,0	2,0...4,0	≤1,0	6,0...8,0	6,0...8,0

Таблица 9. Основные свойства смеси П-4

Вязкость при $t = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, Па·с	Температура, $^\circ\text{C}$		
	деформации	начала плавления	растекания
1,0356	1165,52	1251,3	1288,19

Состав шлаков сталеразливочного ковша в конце обработки на установке ковш-печь приведен в таблице 10.

Таблица 10. Состав шлака в сталеразливочном ковше после обработки плавки на УКП

Номер измерения	Содержание в шлаке, мас. %					
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe _{общ}
1	10,33	36,39	7,65	41,81	0,35	0,66
2	6,6	30,71	7,77	51,31	0,14	0,29
3	6,77	31,11	7,95	51,62	0,28	0,6
4	6,54	30,93	7,79	52,2	0,16	0,31
5	6,32	30,42	7,72	51,51	0,13	0,29
6	5,62	27,16	8,09	50,71	0,24	0,45
7	7,58	31,61	7,75	47,25	0,26	0,58
8	8,4	35,12	9,48	47,49	0,28	0,78
9	8,39	34,63	9,34	48,34	0,3	0,51
10	5,34	41,89	6,23	41,2	0,36	0,54
11	5,47	39,4	6,79	41,06	0,62	1,33
12	5,47	39,4	6,79	41,06	0,62	1,33
13	7,75	29,91	13,11	43,09	0,46	0,46
14	5,52	38,2	7,22	41,44	0,36	0,55
15	6,22	33,81	9,69	42,42	0,44	0,47
Среднее	6,82	34,05	8,22	46,17	0,33	0,61

Результаты оценки влияния шлака сталеразливочного ковша на изменение химического состава шлака промежуточного ковша при разливке серии из восьми плавов приведены на рисунках 22–27.

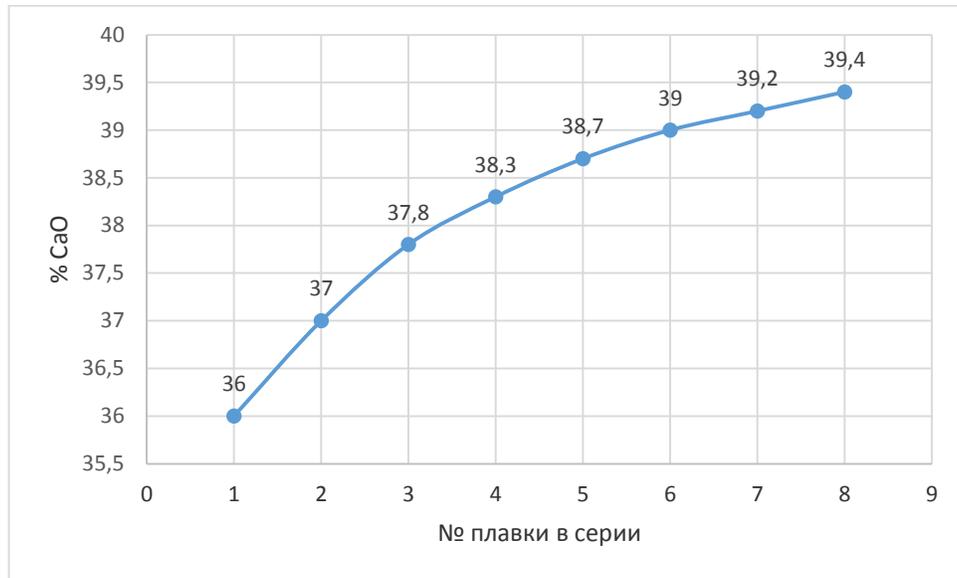


Рисунок 22. Изменение содержания CaO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

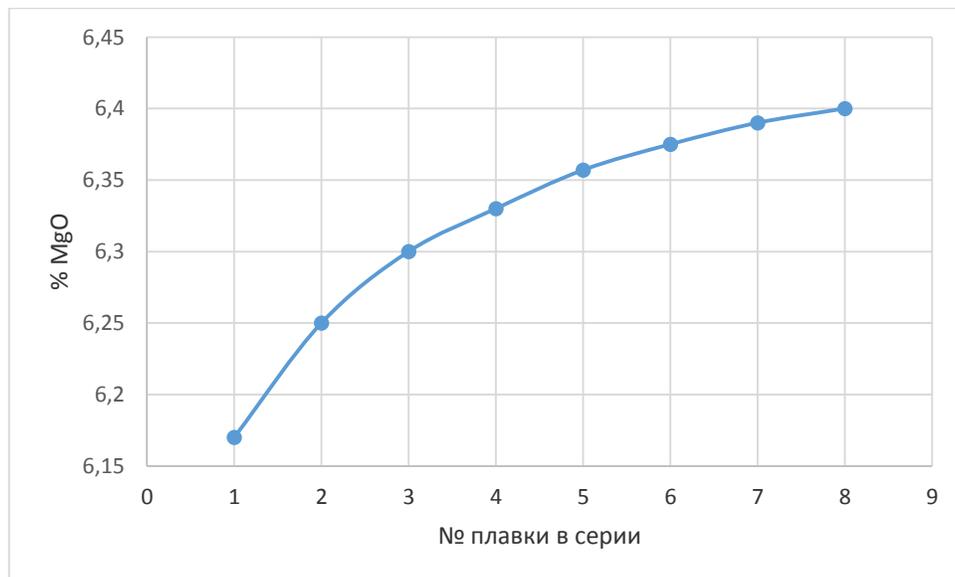


Рисунок 23. Изменение содержания MgO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

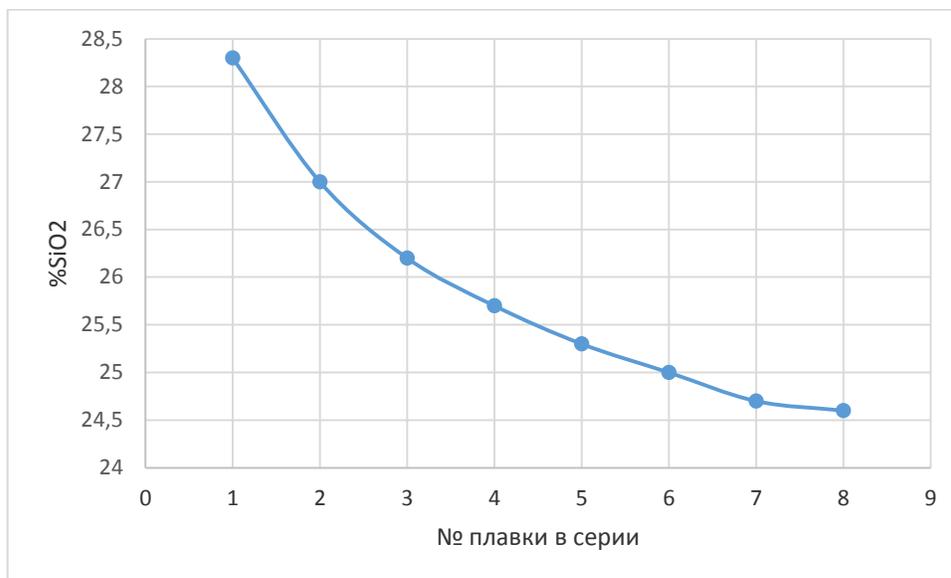


Рисунок 24. Изменение содержания SiO₂ в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

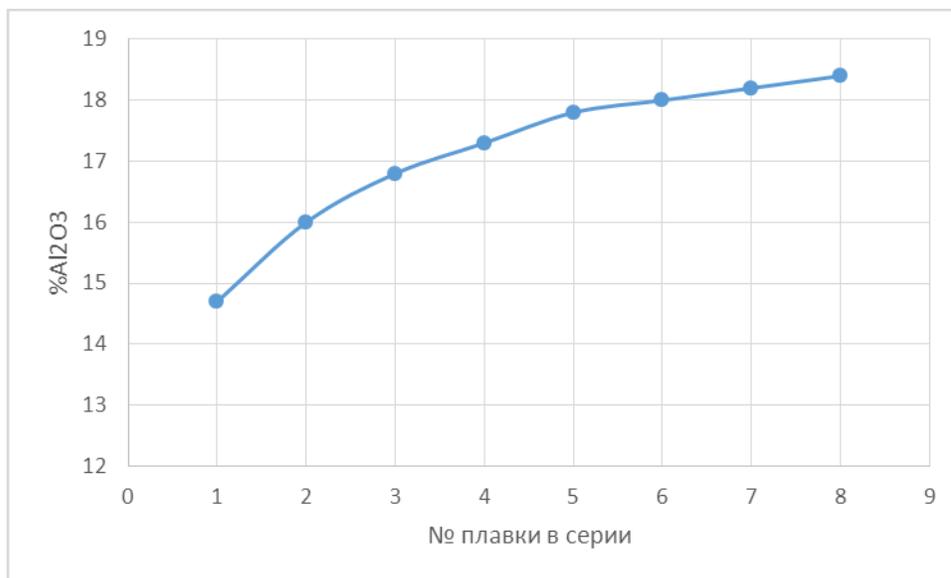


Рисунок 25. Изменение содержания Al₂O₃ в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

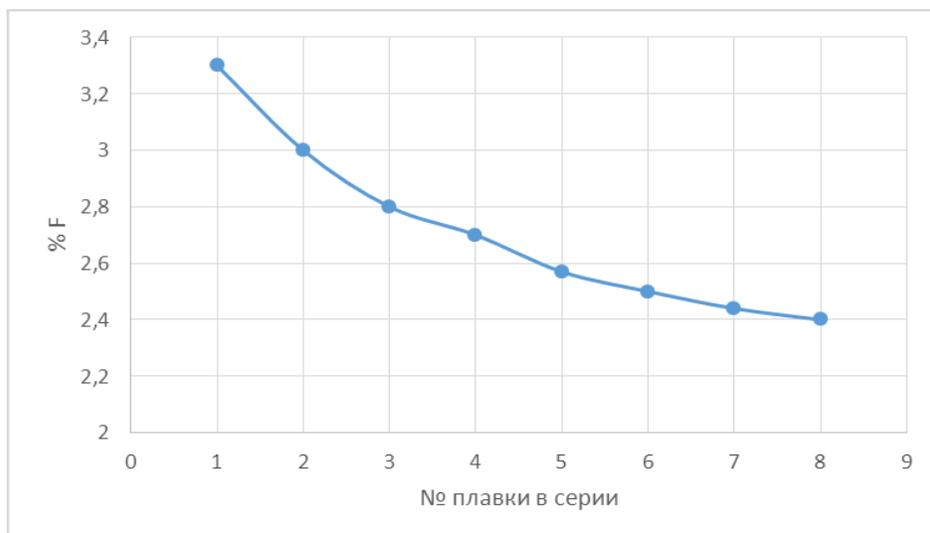


Рисунок 26. Изменение содержания иона фтора в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

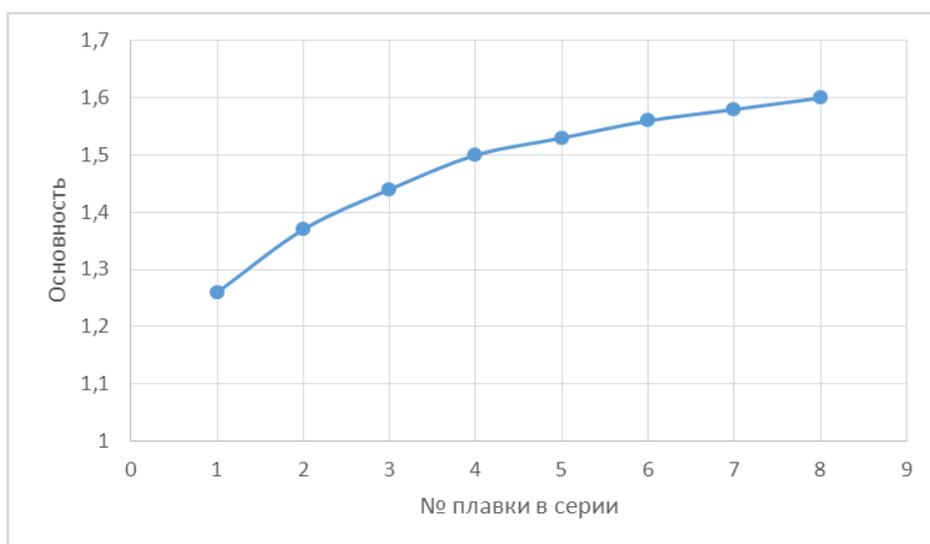


Рисунок 27. Изменение основности шлака промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков

Из представленных результатов следует, что в процессе непрерывной разливки стали происходит существенное изменение содержания базовых компонентов покровного шлака: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO и F^+ . При этом важно отметить, что получаемый шлак по своему химическому составу выходит за границы интервала концентраций, допустимых для смеси П-4, и, следовательно,

заявленные значения вязкости и характеристических температур шлака не обеспечиваются.

Изменение химического состава покровного шлака в процессе разливки представлено штриховой линией на рисунке 28. Как следует из представленных данных, шлаковый расплав в каждой последующей плавке внутри одной серии будет иметь все большую температуру растекания, что приводит к постоянному снижению количества жидкого слоя в шлаке, увеличению его вязкости и, как следствие, к ухудшению условий перехода неметаллических включений из расплава в покровный шлак. Результатом такого процесса является рост количества включений, попадающих в погружной стакан, и его затягивание ими в процессе разливки.

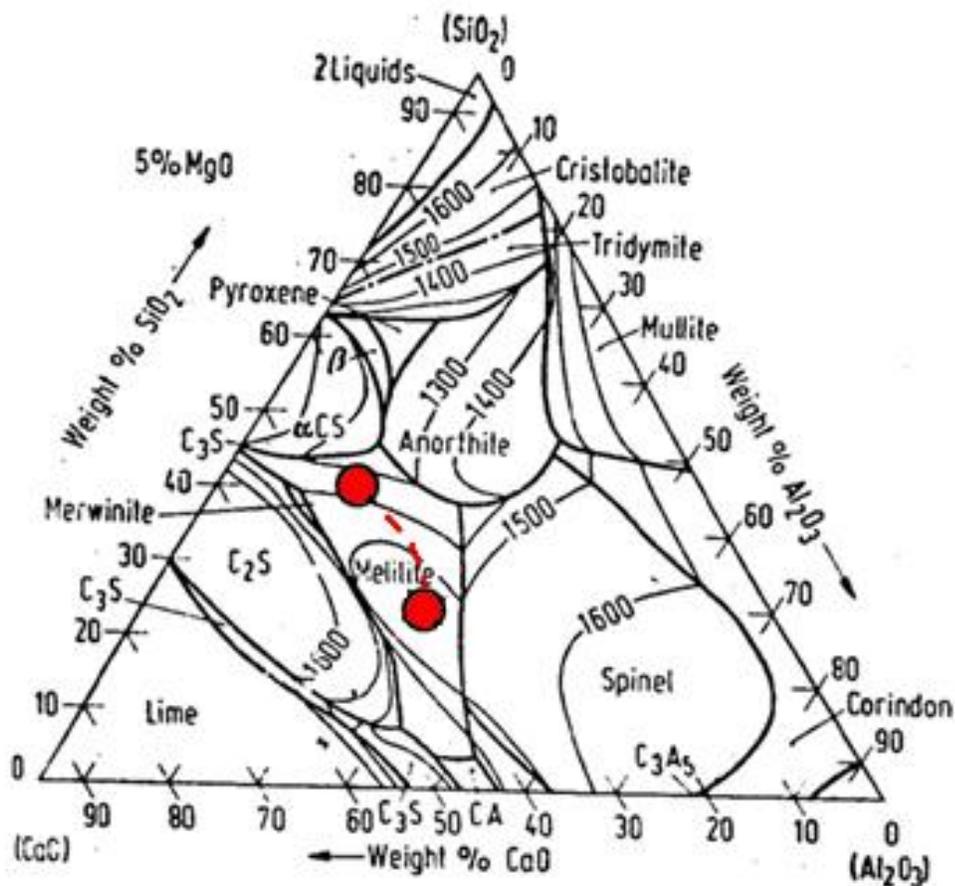


Рисунок 28. Изменение состава покровного шлака промежуточного ковша

Таким образом, проведенное комплексное исследование показало, что для стабилизации непрерывной разливки стали С45Е необходимо разработать технологию разливки, обеспечивающую сохранение высокой рафинирующей способности покровного шлака в промковше на протяжении разливки всей серии плавов.

Глава 4. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ

На рисунке 29 показана область тройной диаграммы состояния, при попадании в которую базовый состав шлака в промежуточном ковше позволяет сохранять физико-химические свойства шлака на оптимальном для эффективной ассимиляции неметаллических включений уровне.

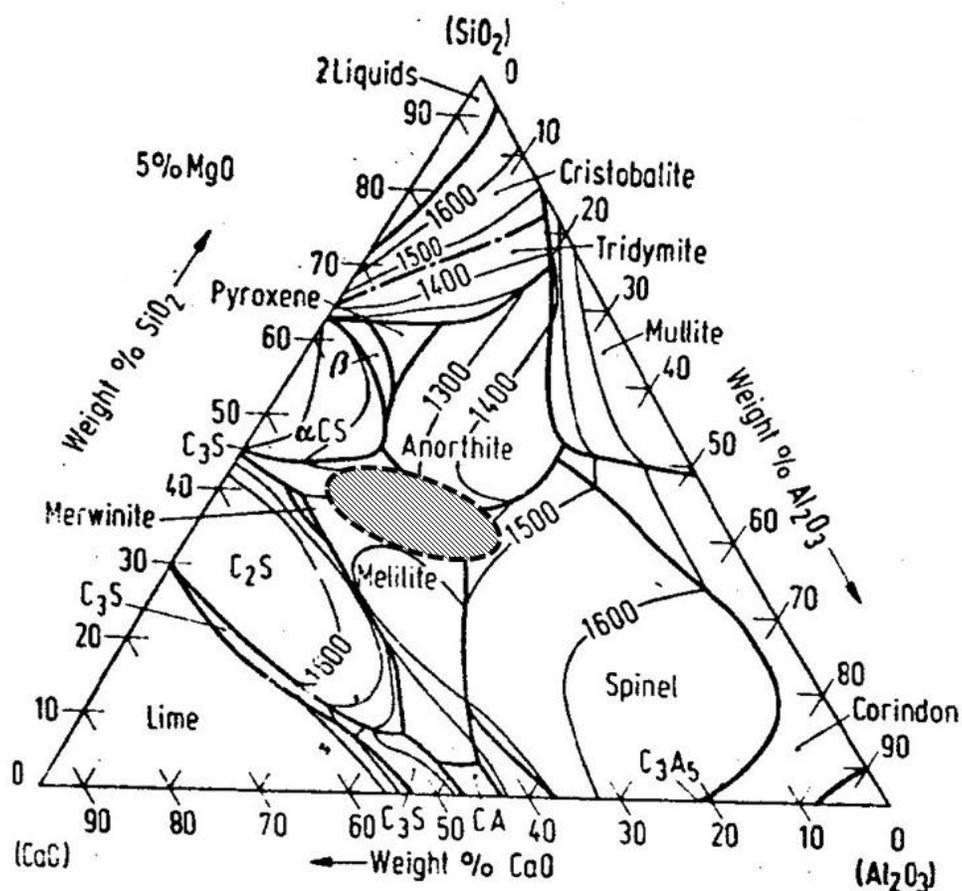


Рисунок 29. Область допустимого изменения состава шлака в промежуточном ковше

Как видно из диаграммы (см. рисунок 29), достижение заданной цели возможно при сохранении основности (отношения CaO/SiO₂) шлакового расплава

в промежуточном ковше на уровне 0,90...1,15. Это возможно при выполнении следующих условий:

1. Основность жидкого шлака в сталеразливочном ковше после внепечной обработки должна быть в пределах $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,8 \dots 1,2$.

2. Шлак сталеразливочного ковша должен иметь как можно более низкое содержание оксида алюминия (не более 15 мас. %).

Исходя из этих требований были разработаны различные варианты химического состава шлаковых смесей, присаживаемых в сталеразливочный ковш. На рисунке 30 представлена диаграмма четырехкомпонентной системы $\text{SiO}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--5\% MgO}$ на которой точкой 1 отмечена область, соответствующая составу высокоосновного шлака после обработки плавки на установке ковш-печь; точкой 2 показана область, которая соответствует целевому составу шлака в сталеразливочном ковше после подачи ШОС, точками 3–7 обозначены области вариантов состава разрабатываемой ШОС.

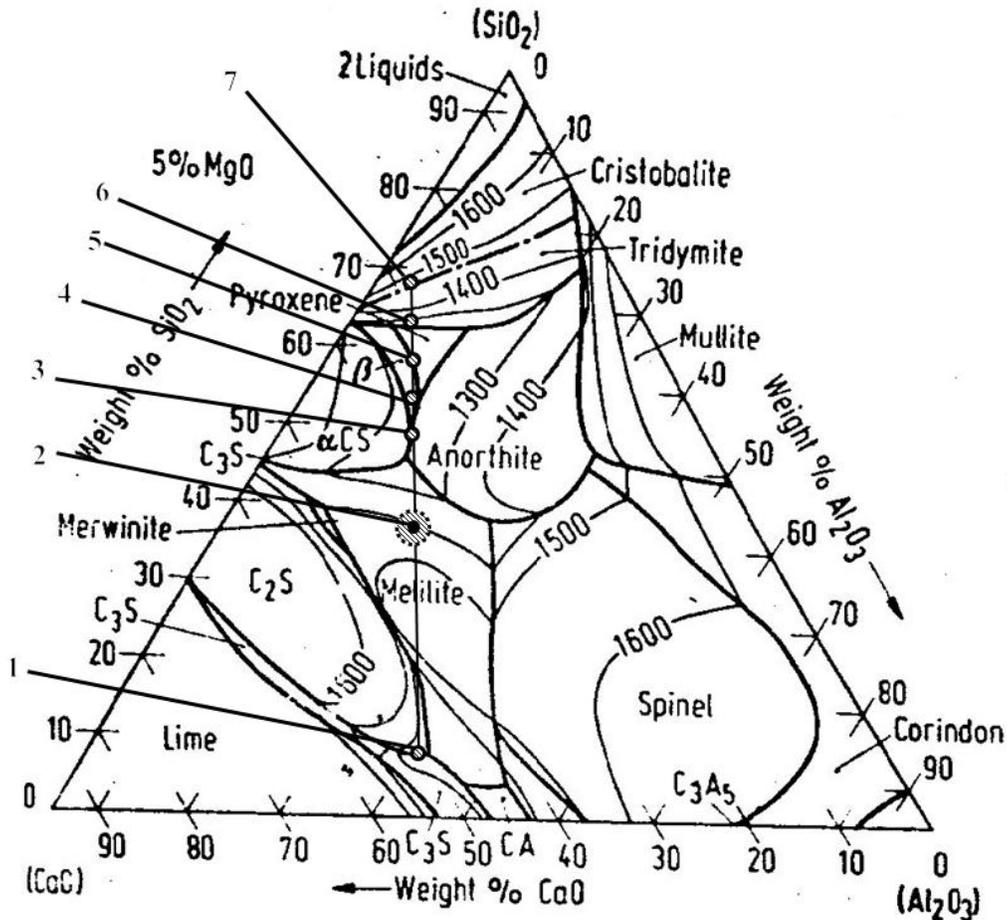


Рисунок 30. Варианты составов разрабатываемой ШОС для подачи в сталеразливочный ковш

Для оптимизации конечного количества шлака в сталеразливочном ковше перед подачей шлаковой смеси необходимо удалить излишнее количество первичного высокоосновного шлака. В связи с этим в предлагаемой технологии предложен слив шлака после обработки расплава на установке ковш-печь до достижения слоя шлака в сталеразливочном ковше толщиной не более 25 мм, что соответствует массе шлака 150...250 кг. Исходя из этих условий рассчитали несколько вариантов компонентного состава ШОС (остаточное количество шлака принято равным 200 кг). Результаты представлены в таблице 12.

Таблица 12. Расчетное количество присадки компонентов различных вариантов разрабатываемой ШОС

Параметры	Вариант ШОС				
	1	2	3	4	5
Основность CaO/SiO ₂	0,63...0,68	0,53...0,58	0,45...0,50	0,39...0,44	0,33...0,38
Точка на рисунке 30	3	4	5	6	7
Масса присадки, кг	460	330	250	210	180

При разработке покровных шлаков для сталеразливочного ковша следует учитывать, что важнейшей функцией этих шлаков является теплоизоляция металла. Для оценки эффективности использования различных присадок для шлаков в сталеразливочном ковше был произведен расчет зависимости теплового потока от температуры шлака для различных вариантов присадок ШОС в сталеразливочный ковш в соответствии с результатами, представленными в таблице 12.

Математическая модель определения температуры верхнего слоя шлака строится на основе уравнения стационарной теплопроводности, с учетом следующих допущений:

- 1) Толщина шлака с присадкой определяется исходя из массы присадки, массы шлака и площади поперечного сечения сталеразливочного ковша;
- 2) Коэффициент теплопроводности шлака принимается постоянным для всех пяти вариантов состава шлака и его значение равно 3,5 Вт/(м·К);
- 3) Учитывается теплопередача только по механизму конвективного теплообмена.

Уравнение стационарной теплопроводности для исследуемой задачи выглядит следующим образом [82]:

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (4.1)$$

где q – тепловой поток, k – коэффициент теплопроводности шлака, d – толщина слоя шлака, определяемая по массе и плотности шлака, а также площади поперечного сечения сталеразливочного ковша, T_1 – температура стали, T_2 – температура поверхности шлака.

Пояснение соотношения (4.1) приведено на рисунке 31.

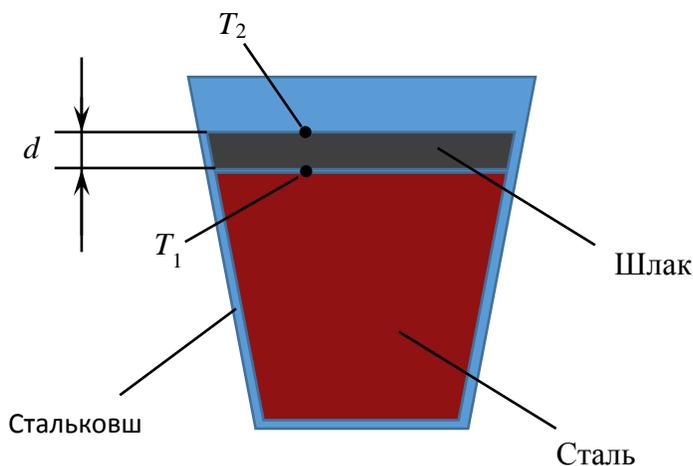


Рисунок 31. К определению температуры поверхности шлака

Температура стали T_1 для исследуемого сталеразливочного ковша и разливаемых марок стали принимается равной 1580 °С. Площадь поперечного сечения сталеразливочного ковша S на уровне, где расположен шлак, определяется согласно размерам [2] для ковша типа КС-150

$$S = 8 \text{ м}^2. \quad (4.2)$$

Согласно данным таблицы 12, общая масса шлака в сталеразливочном ковше m равна соответственно 660, 530, 450, 410 и 380 кг для пяти шлаков. Плотность шлака ρ принимается равной 3000 кг/м³. Таким образом, согласно

формуле для объема шлака, можно вычислить толщину слоя d_i для исследуемых пяти шлаков

$$d_i = m_i \cdot \rho / S. \quad (4.3)$$

Из соотношения 4.3 определяется толщина слоя для пяти различных шлаков:
 $d_1 = 0,245$ м, $d_2 = 0,196$ м, $d_3 = 0,167$ м, $d_4 = 0,152$ м, $d_5 = 0,141$ м. (4.4)

По соотношению (4.1) при учете данных (4.2)–(4.4) была рассчитана зависимость температуры поверхности шлака от теплового потока для пяти вариантов смесей. При этом тепловой поток варьировался от 2 до 20 кВт/м².

На рисунке 32 представлены зависимости температуры поверхности шлака от величины теплового потока.

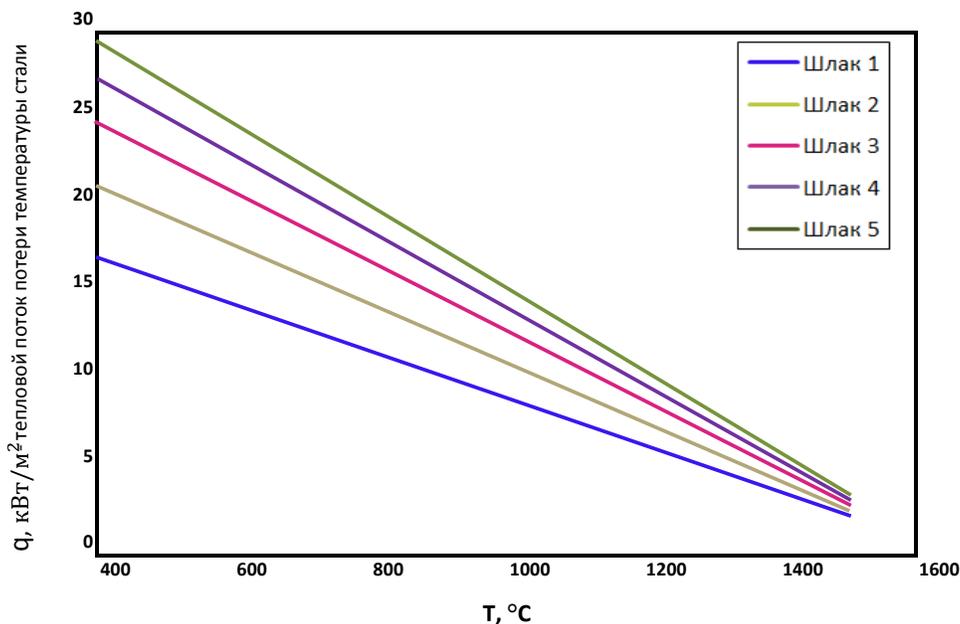


Рисунок 32. Зависимость теплового потока от температуры поверхности шлака

Как видно из рисунка 32, для поддержания определенной температуры поверхности шлака при использовании различных шлаков расходуется различное количество тепла. С точки зрения минимизации тепловых потерь наилучшим вариантом является шлак № 1, характеризующийся наибольшей толщиной слоя.

Однако величины теплового потока для различных шлаков являются значениями одного порядка, т.е. шлаки № 1 и № 2 не обладают принципиально большими теплоизоляционными свойствами по сравнению со шлаками № 3 и № 4.

Таким образом, при выборе вариантов технологических присадок необходимо исходить из экономической целесообразности применения ШОС того или иного типа. Очевидно, что применение ШОС № 1 и № 2 приведет к большим затратам, что связано с большей массой необходимых присадок – 460 и 330 кг по сравнению с массой присадок по вариантам № 3, № 4 и № 5 – 250, 210 и 180 кг. Таким образом, дальнейшую работу проводили со смесями по вариантам №№ 3, 4 и 5.

ШОС после их подачи в сталеразливочный ковш в количестве, указанном в таблице 4.1, в результате смешивания с остатками высокоосновного шлака будут образовывать шлаковый расплав с достаточно низкой температурой плавления. После подачи ШОС в сталеразливочный ковш для достаточно быстрого расплавления они должны иметь температуру растекания не выше 1250 °С. Вязкость ШОС также не должна быть слишком высокой во избежание формирования гетерогенного шлака, но и не должна быть очень низкой во избежание усиленной эрозии футеровки сталеразливочного ковша – оптимальная вязкость разрабатываемой ШОС при температуре 1300 °С находится в интервале 0,7...1,5 Па·с., (выбор расчетной модели вязкости ШОС согласно [88]).

Для производства шлакообразующей смеси необходимо подобрать компонентный состав, отвечающий следующим требованиям:

- компонентный состав должен гарантировать стабильность химического состава получаемой ШОС;
- компонентный состав должен минимизировать стоимость получаемой ШОС.

В качестве материалов, используемых в качестве исходных компонентов ШОС, предпочтительными являются искусственные. Они имеют более стабильный химический состав и содержат меньше вредных примесей. Чем ближе химический состав искусственного материала к конечному составу шлакообразующей смеси, тем меньше добавок потребуется при изготовлении и тем стабильнее будут рабочие характеристики шлака. Такие материалы также упрощают логистику и технологию производства смесей. Однако, организация специального производства таких материалов в сравнительно небольших количествах сложна и весьма затратна. Поэтому при производстве ШОС используют недорогие и широко распространенные искусственные материалы.

В первом приближении необходимо получить требуемую основность смеси, что при использовании цементов или шликеров с основностью 2.5-3,0 требует введения значительного количества оксида кремния. Этот оксид можно внести добавками кварца, песка, сиенитового концентрата, силикатной глыбы, слюд и шпата полевого. Предпочтительными компонентом являются силикатная глыба и сиенитовый концентрат, которые помимо оксида кремния содержат оксиды натрия и калия. Однако силикатная глыба поглощает влагу как в чистом виде, так и в смеси. При изготовлении порошковых ШОС на производствах, непосредственно примыкающих к металлургическим заводам, где смесь идет в работу не позднее 3-5 дней после изготовления, силикатная глыба вполне может использоваться. В случае, когда предполагается транспортировка порошковых ШОС на большие расстояния и их длительное хранение на складе, целесообразна замена силикатной глыбы сиенитовым концентратом с добавлением соды и кварца. Несмотря на то, что сода также гигроскопична, меньшее ее содержание в смеси позволяет осуществлять длительное хранение и транспортировку без потери качества.

В качестве основного компонента, регулирующего скорость плавления смеси, используют следующие углеродсодержащие материалы: графит литейный скрытокристаллический марок 2 и 3, пыль с фильтров при сухом тушении кокса, молотую коксовую мелочь, молотый антрацит и различные искусственные материалы.

Коррекция смеси по составу оксидов алюминия и магния осуществляется введением сиенита и чистого оксида магния. Также возможна добавка в ШОС молотых отходов огнеупорного производства, содержащих эти оксиды.

В таблицах 13 и 14 приведен перечень сырьевых материалов, которые могут быть задействованы при производстве ШОС, а также основные требования к ним.

Таблица 13. Основные компоненты для изготовления ШОС

Базовый оксид	Компонент	Природа компонента	Массовая доля, %							ГОСТ, ТУ
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	C	
CaO	Портландцемент	Сплавленный	53-64	20-30	4,3	2,2	3,0	1,2	-	10178-88
	Известь	Синтетический	84-90	6-14	-	2,5-3,0	-	-	-	9179-77
	Шлак ферросплавного производства	Сплавленный	46	24-32	4-8	7-16	-	-	-	ТУ 14-11-325-97
SiO ₂	Кварц молотый	Природный	0,15	98	0,8	-	0,15	-	-	47-62-71
	Слюда флогопит	Природный	0,7	32-40	14-16	20-40	5-7	10-12	-	13319-67
	Силикатная глыба	Природный	-	68-70	-	-	-	27-30	-	13079-81
	Формовочный песок	Природный	-	≥ 98	-	-	-	-	-	2138-91
R ₂ O	Сода	Синтетический	-	-	-	-	-	60	-	5100-73
	Сиенитовый концентрат	Природный	<3	40-45	25-30	-	<1,5	18-22	-	ТУ-5726-47-00203938-97
	Нефелин (Na,K)AlSiO ₄	Природный	2,4	43,4	28,5	-	3,3	19,3	-	МРТУ 12-011-66
	Силикатная глыба	Природный	-	68-70	-	-	-	27-30	-	13079-81
MgO	Магнезит	Синтетический	до 4,5	до 3,5	-	75-97	-	-	-	1216-87

Базовый оксид	Компонент	Природа компонента	Массовая доля, %							ГОСТ, ТУ
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	C	
	Магнезия жженая	Синтетический	-	-	-	90-96	-	-	-	844-79
	Оксид магния	Синтетический	-	-	-	96-99	-	-	-	4526-75
	Отходы огнеупоров	Отходы	-	≤ 45	-	40-90	-	-	-	-
Углеродсодержащие	Графит ГЛС-3	Природный	Зольность 10...20 %				-	-	80 ... 90	5420-74
	Углерод искусственный	Синтетический	Зольность до 15 %				-	-	85 ... 90	-
	Коксовая пыль	Отходы	Зольность до 15 %				-	-	86 ... 90	ТУ 14-791-86

Таблица 14. Требования к фракционному составу и влажности компонентов для изготовления ШОС

Наименование параметра	Материал										
	Цемент	Кварц молотый пылевидный	Формовочный песок	Сиенитовый концентрат	Силикатная глыба	Графит	Сода	Коксовая мелочь молотая (углерод иск.)	Оксид магния	Шлаки отвальные	Отходы огнеупоров
Доля мелкой фракции 63 мкм и менее, %	Не менее 70	Не менее 85	Не менее 50	Не менее 80	Не менее 80	Не менее 90	Не менее 70	Не менее 70	Не менее 80	Не менее 70	Не менее 30
Доля фракции 1 мм и более, %	$\leq 5,0$										
Доля фракции 3 мм и более, %	0,0										
Влажность, %	Не более 1,0										

Для создания новых составов шлакообразующих смесей был разработан алгоритм, позволяющий на этапе лабораторных исследований наиболее близко подойти к оптимальным для тех или иных условий составам и переходить к опытно-промышленному опробованию с наибольшей вероятностью положительного результата, т.к. неудачные промышленные испытания сопряжены с получением запороченного металла, брака, а иногда и с аварийными ситуациями, что в условиях действующего производства крайне нежелательно.

На рисунке 33 представлена блок-схема алгоритма разработки новых составов ШОС.

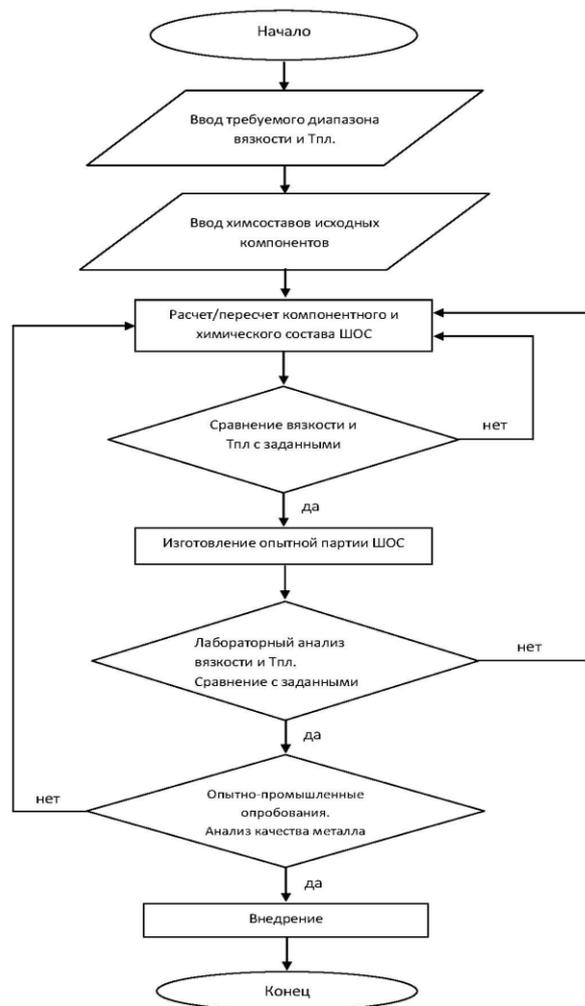


Рисунок 33. Блок-схема алгоритма разработки новых составов ШОС.

- затраты на дополнительную обработку сырьевых материалов (дробление, помол, сушка);
- доступность сырьевых материалов (удаленность основных поставщиков, время поставки).

Из нескольких вариантов компонентных составов были выбраны оптимальные составы каждой ШОС исходя из следующих показателей:

- стоимость сырьевых материалов;
- стабильность химических составов сырьевых материалов;
- затраты на дополнительную обработку сырьевых материалов (дробление, помол, сушка);
- доступность сырьевых материалов (удаленность основных поставщиков, время поставки).

Химический состав ШОС трех вариантов приведен в таблице 15, а компонентный состав каждой из них в двух вариантах – в таблице 16.

Таблица 15. Химический состав ШОС для сталеразливочного ковша (мас. %)

Вариант ШОС	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Fe ₂ O ₃	C
3	50,0...54,0	23,0...27,0	5,5...7,5	4,0...6,0	2,0...5,0	≤ 3,0	3,0...5,0
4	52,0...56,0	20,5...24,5	5,5...7,5	4,0...6,0	2,0...5,0	≤ 3,0	3,0...5,0
5	54,5...58,5	19,0...23,0	5,5...7,5	4,0...6,0	2,0...5,0	≤ 3,0	3,0...5,0

Таблица 16. Компонентный состав ШОС для сталеразливочного ковша

Вариант ШОС	Содержание компонентов, мас. %					
	Портланд-цемент ПЦ 500	Сиенит	Формовочный песок	Угл. искус.	Отходы огнеупоров (MgO+SiO ₂)	Оксид магния
3.1	37,0	15,0	33,0	5,0	10,0	0,0
3.2	38,0	15,0	38,0	4,0	0,0	5,0
4.1	34,0	15,0	36,0	5,0	10,0	0,0
4.2	35,0	15,0	41,0	4,0	0,0	5,0
5.1	31,0	15,0	39,0	5,0	10,0	0,0
5.2	32,0	15,0	44,0	4,0	0,0	5,0

С использованием каждой из полученных шихтовок были изготовлены образцы материала массой около 100 г и переданы для исследования физико-химических характеристик совместно с пробой ШОС П-4. Результаты исследований приведены в таблице 17.

Таблица 17. Физические свойства разработанных составов ШОС и смеси П-4

Вариант ШОС	CaO/SiO ₂	$T_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н.пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{растек}}, ^\circ\text{C}$	η при 1300 °C, Па·с
П-4	1,00...1,15	1184	1201	1211	0,72
3.1	0,4...0,50	1196	1218	1223	1,02
3.2		1214	1234	1240	1,05
4.1	0,39...0,44	1198	1214	1219	1,10
4.2		1215	1227	1233	1,12
5.1	0,33...0,38	1251	1267	1279	> 1,50
5.2		1263	1277	1292	> 1,50

С уменьшением основности ШОС существенно возрастает ее вязкость. Температурный интервал плавления (область от $T_{\text{н.пл}}$ до $T_{\text{растек}}$) ШОС вариантов 3 и 4 практически одинаков: 1214...1240 °C, а при снижении основности до 0,33...0,38 (вариант 5) температуры начала плавления и растекания возрастают до недопустимых значений.

Таким образом, составы 5.1 и 5.2 использовать нежелательно. Варианты ШОС 3 и 4 равнозначны по своим физико-химическим характеристикам, следовательно, целесообразно использовать состав с наименьшим удельным расходом, т.е., согласно таблице 12, состав ШОС № 4 с основностью 0,39...0,44.

Из модификаций состава 4 наиболее предпочтительным с экономической точки зрения выглядит состав 4.1, содержащий отходы огнеупорного производства, что приводит к его меньшей стоимости. В случае невозможности закупки производителем ШОС отходов огнеупорного производства допускается изготовление ШОС по шихтовке 4.2.

Промышленные испытания проводили со смесью по шихтовке № 4.1, названной ШОС П-4ск. На четырехкомпонентной диаграмме CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO (рисунок 33) указаны области, соответствующие среднему базовому составу

шлака в сталеразливочном ковше при производстве стали С45Е до вакуумной обработки с применением различных ШОС [86].

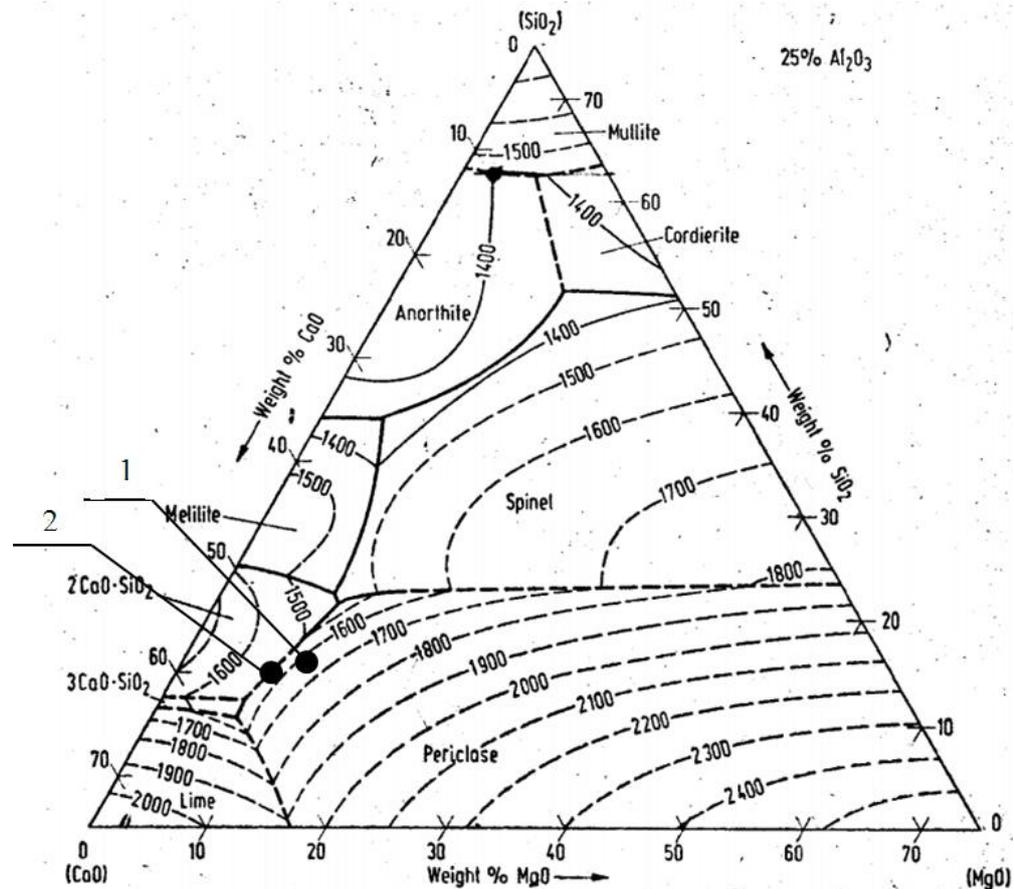


Рисунок 35. Базовые составы шлака в сталеразливочном ковше после вакуумной обработки стали в ковшовом вакууматоре при производстве стали марки С45Е с применением ШОС:
1 – П-4; 2 – П-4ск

Из диаграммы, представленной на рисунке 35, следует, что после добавления опытной ШОС П-4ск температура ликвидус шлака в сталеразливочном ковше ориентировочно на 100 °С ниже, чем при использовании промышленной ШОС П-4. То есть при использовании опытных ШОС создаются лучшие условия для ассимиляции неметаллических включений, всплывающих в объеме стали в сталеразливочном ковше за время транспортировки ковша на МНЛЗ и непосредственно самой разливки. Состав опытных ассимиляционных ШОС и их удельный расход подбирали таким образом, чтобы снизить основность шлака в сталеразливочном ковше перед подачей плавки на МНЛЗ до величины 1,1...1,3. На

основе расчетов рекомендованы следующие параметры шлакового режима: 150 кг шлака в промежуточный ковш, 200 кг смеси П-4ск в сталеразливочный ковш и оставление при скачивании шлака из сталеразливочного ковша после обработки на установке ковш-печь – не более 500 кг. На рисунках 36–42 показано изменение содержания компонентов в шлаках и их основности на плавках с использованием ШОС сравнительного варианта и варианта с добавлением разработанной ШОС П-4ск (опытный).

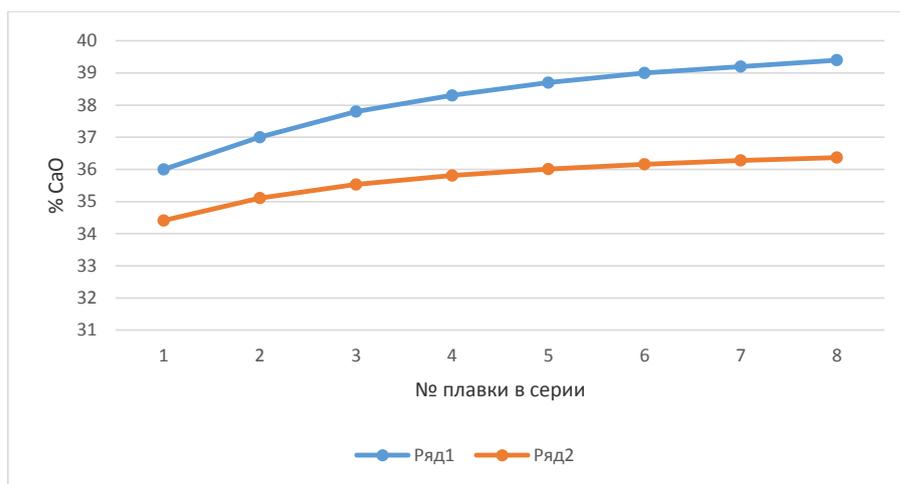


Рисунок 36. Изменение содержания CaO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

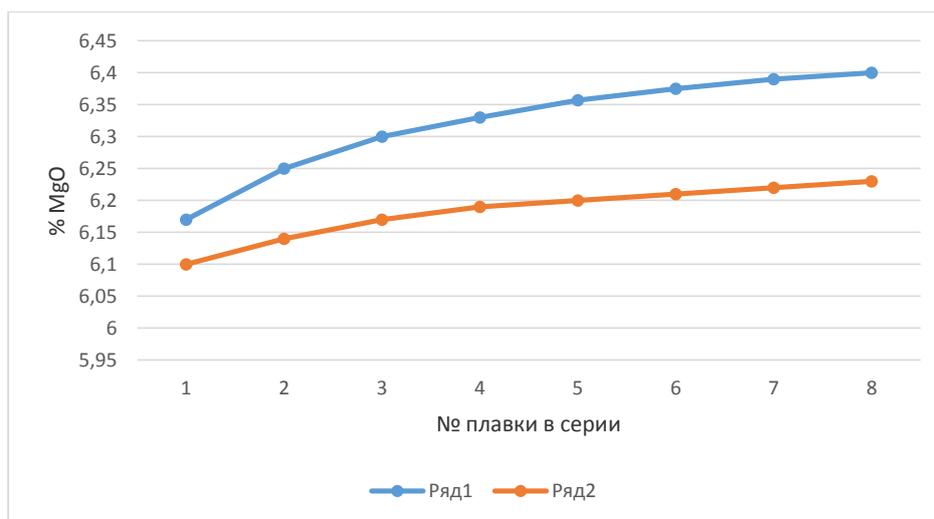


Рисунок 37. Изменение содержания MgO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

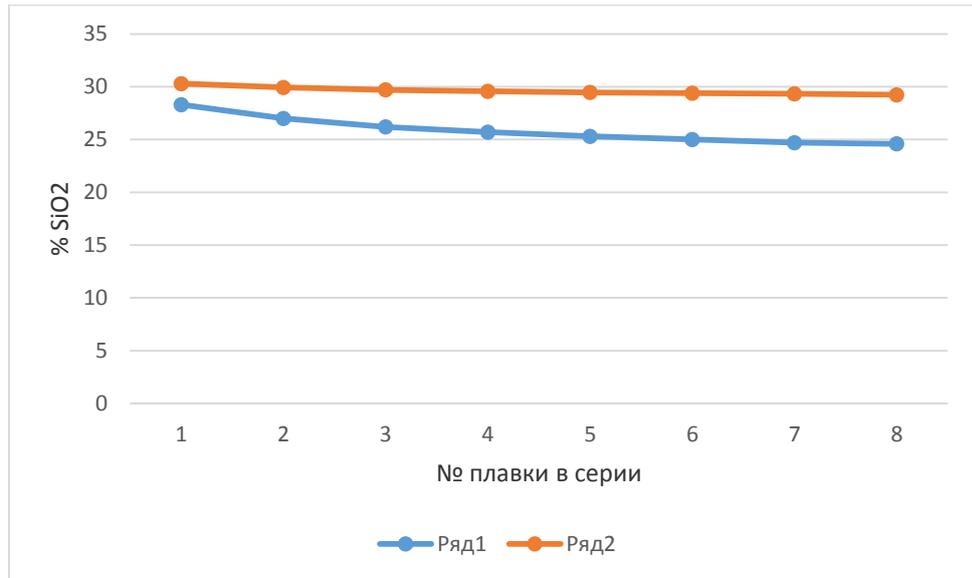


Рисунок 38. Изменение содержания SiO_2 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

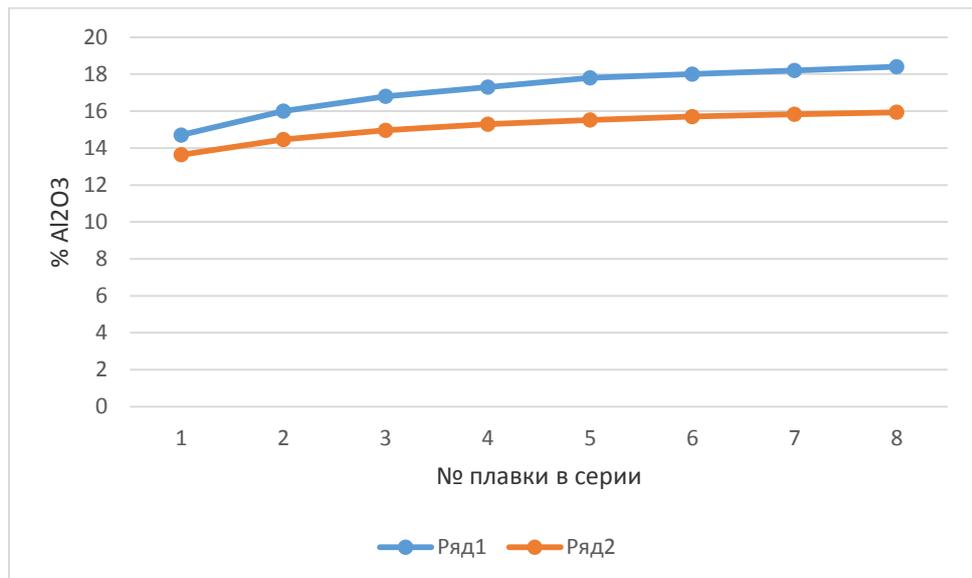


Рисунок 39. Изменение содержания Al_2O_3 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

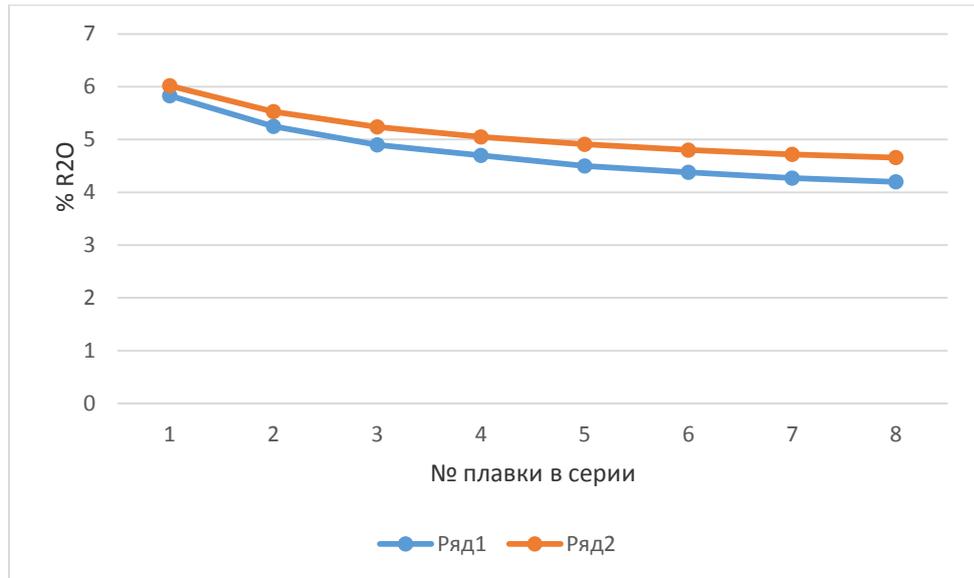


Рисунок 40. Изменение содержания R_2O в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

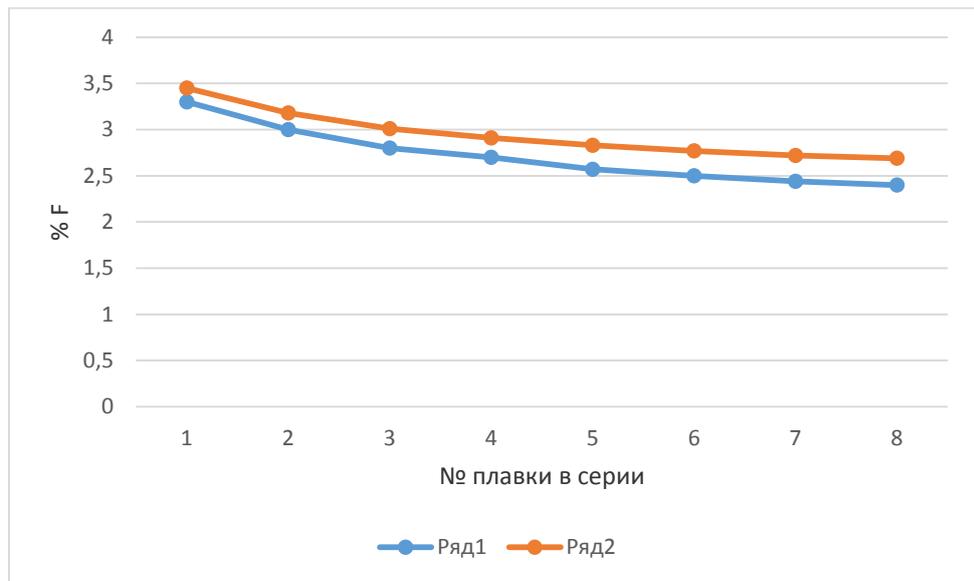


Рисунок 41. Изменение содержания F-иона в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

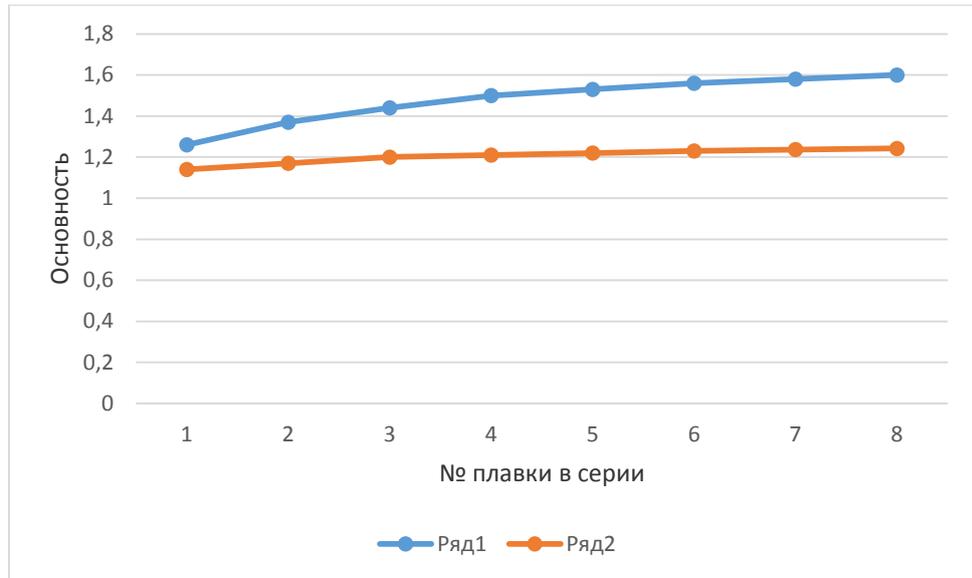


Рисунок 42. Изменение основности шлака промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – сравнительный вариант ШОС, ряд 2 – опытный вариант ШОС

Анализируя рисунки 36, 38, 39 и 42 можно сделать вывод, что при использовании опытной смеси П-4ск в сталковше, в шлаке промежуточного ковша по ходу разливки серии плавков значительно меньше изменяется содержание CaO , SiO_2 и Al_2O_3 , что свидетельствует о сохранении базового состава в пределах той зоны тройной диаграммы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$, где температура плавления и вязкость шлака позволяют хорошо ассимилировать включения. Это подтверждается и рисунками 40 и 41, из которых видно, что по ходу разливки серии плавков снижение содержания в шлаке промковша оксидов калия и натрия, а также фтора меньше в опытном варианте, что свидетельствует о меньшем снижении вязкости и повышении температуры плавления, не выходящих за пределы, необходимые для ассимиляции включений.

Для примера на рисунках 43–50 показано изменение содержание компонентов в шлаках и основности в случае остатка шлака после скачивания 500 кг и 1000 кг (нарушение технологии).

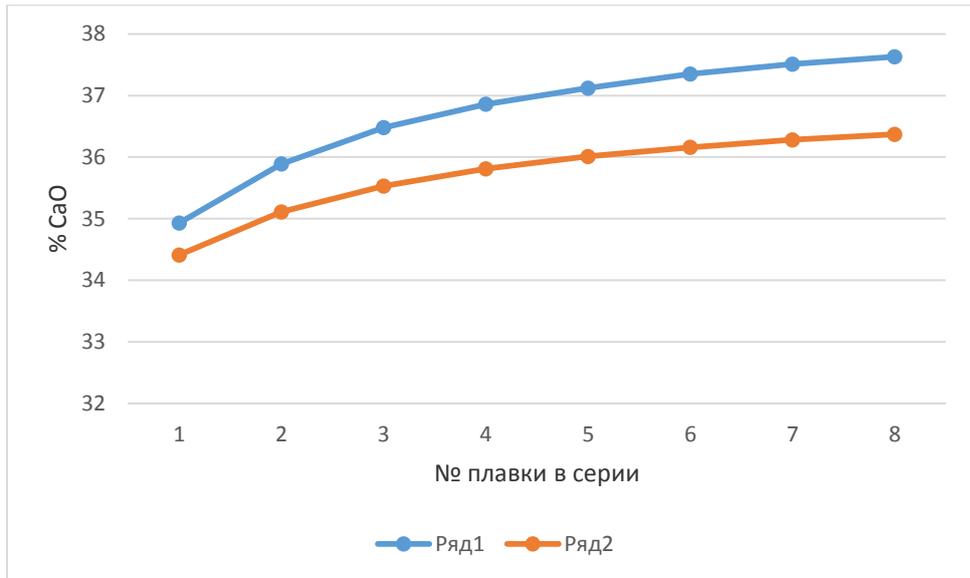


Рисунок 43. Изменение содержания CaO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

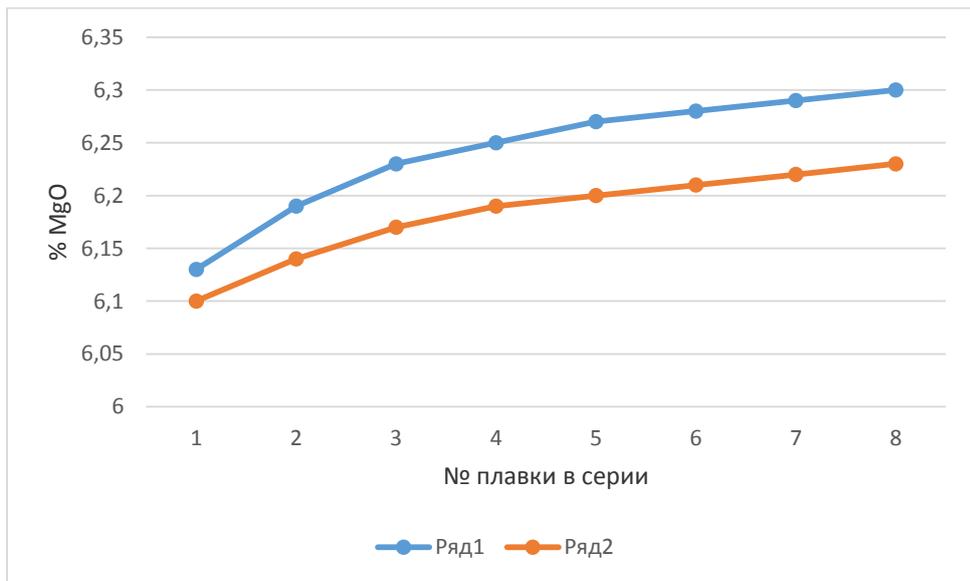


Рисунок 44. Изменение содержания MgO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

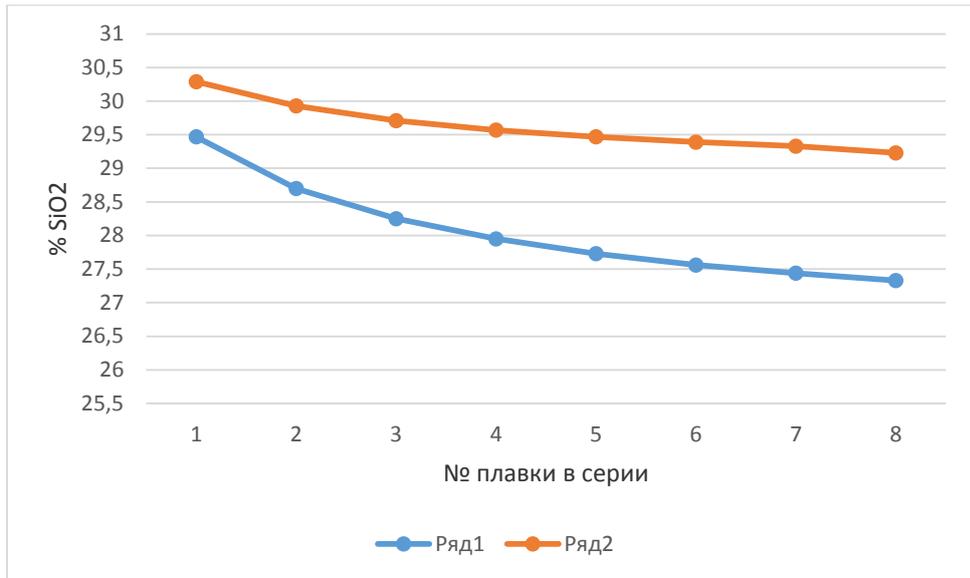


Рисунок 45. Изменение содержания SiO_2 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

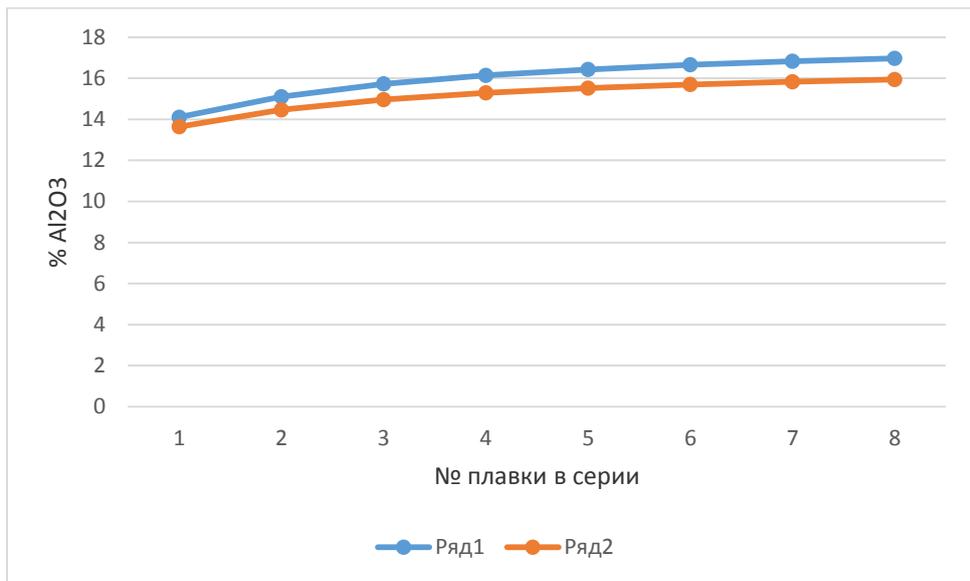


Рисунок 46. Изменение содержания Al_2O_3 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

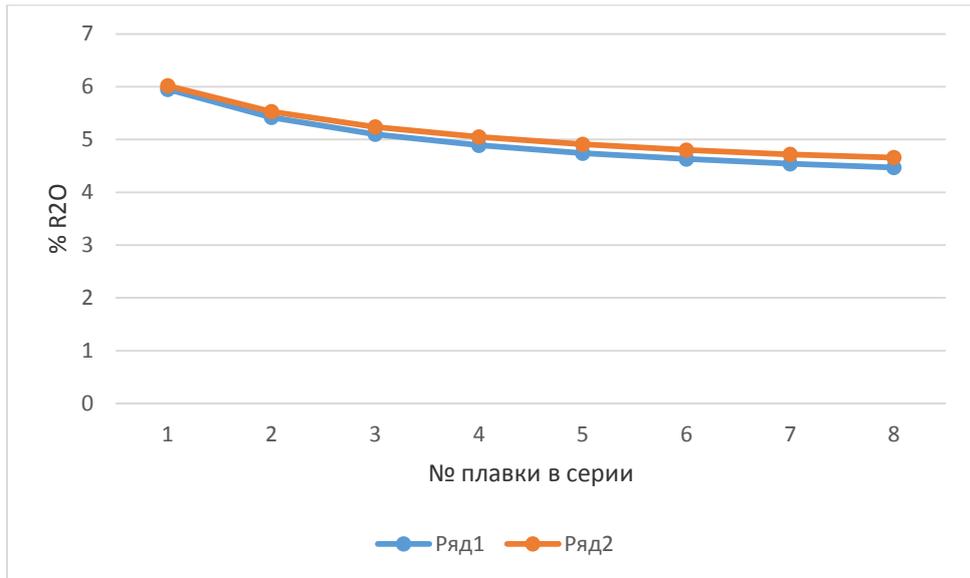


Рисунок 47. Изменение содержания R_2O в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

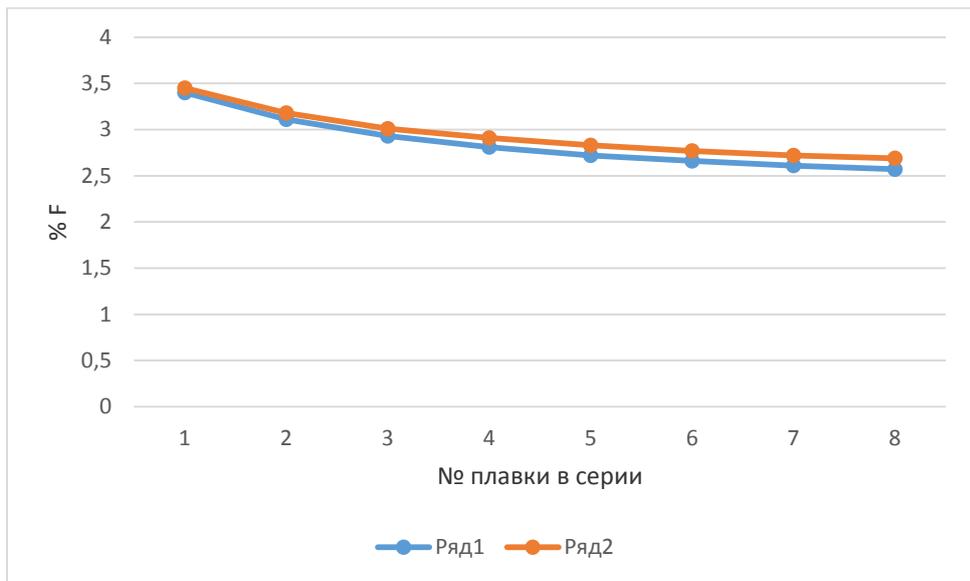


Рисунок 48. Изменение содержания F-иона в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

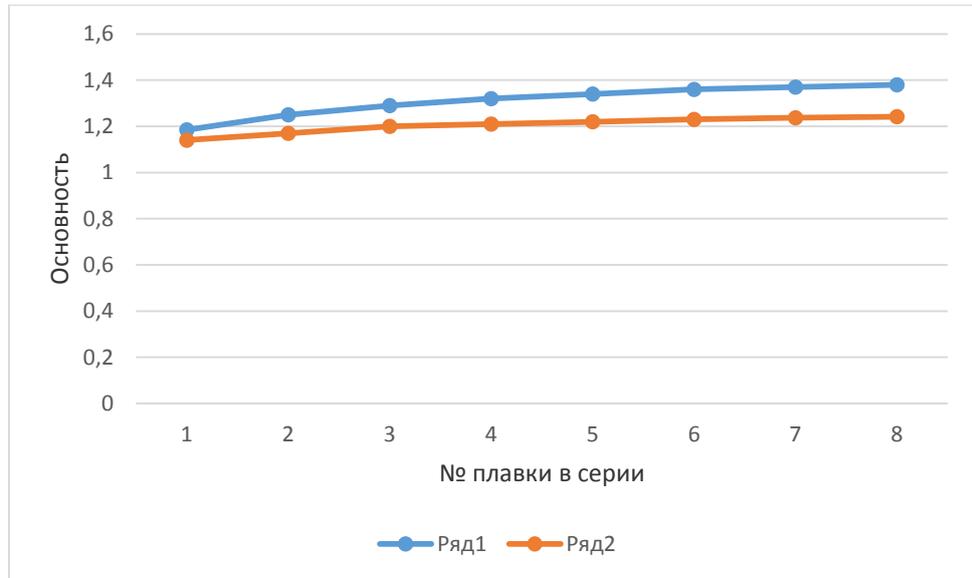


Рисунок 49. Изменение основности шлака промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков при остатке шлака: ряд 1 – 1000 кг, ряд 2 – 500 кг

Из анализа рисунков 43-49 следует, что максимально возможное скачивание высокоосновного шлака сталковша, ограниченное лишь техническими возможностями, и наведение нового низкоосновного шлака приводит к меньшему изменению химического состава шлака в промежуточном ковше и позволяет сохранить требуемый диапазон вязкости и температуры плавления и обеспечить ассимиляцию включений на протяжении всей серии плавков.

На рисунках 48–53 показано изменение содержания компонентов в шлаке промежуточного ковша и их основности при добавлении в сталеразливочный ковш 100 кг ШОС П-4ск и 200 кг ШОС П-4ск. Добавка более 200 кг ШОС П-4ск нецелесообразна по экономическим соображениям. Кроме того, толстый слой шлака будет затруднять удаление водорода при вакуумировании.

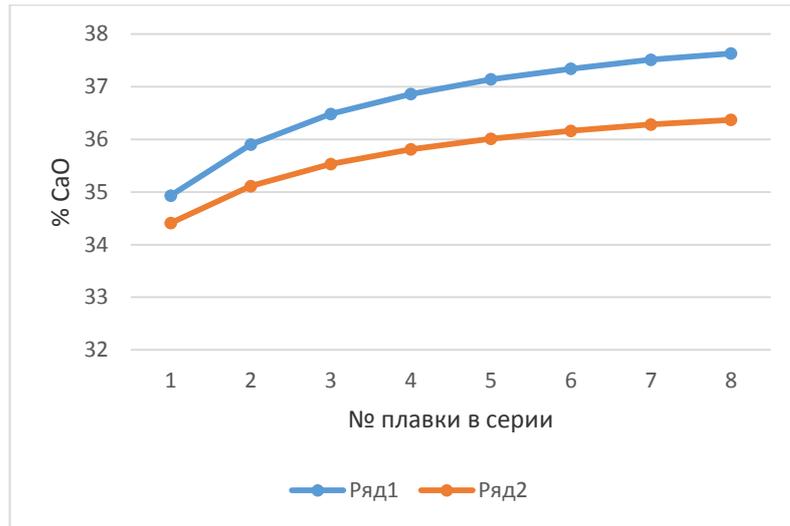


Рисунок 50. Изменение содержания CaO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков:
 ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

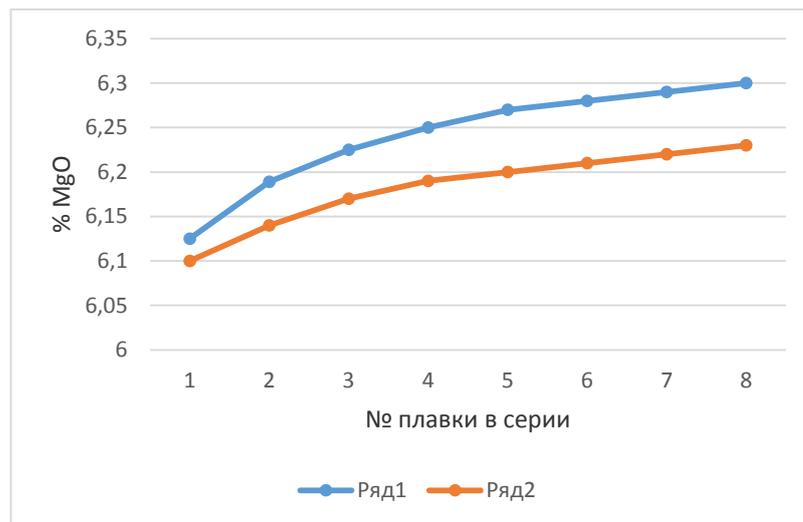


Рисунок 51. Изменение содержания MgO в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков:
 ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

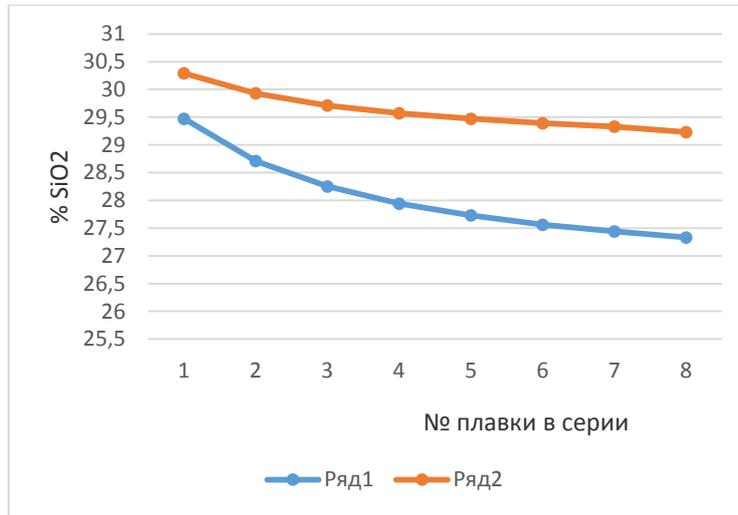


Рисунок 52. Изменение содержания SiO_2 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков:
 ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

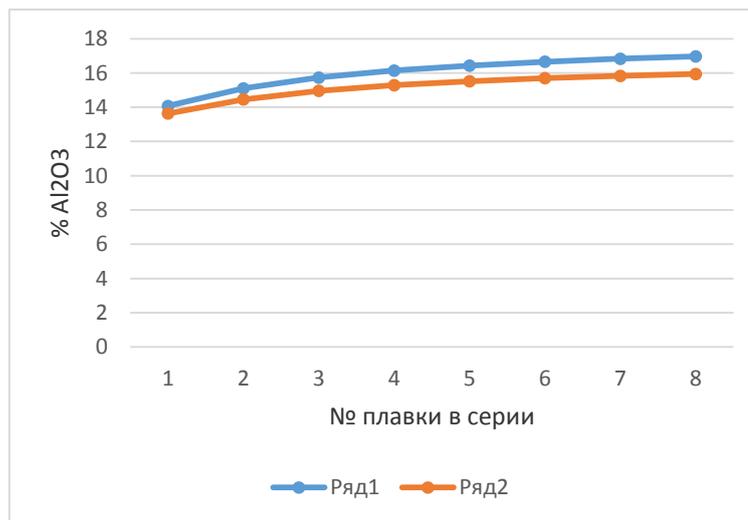


Рисунок 53. Изменение содержания Al_2O_3 в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков:
 ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

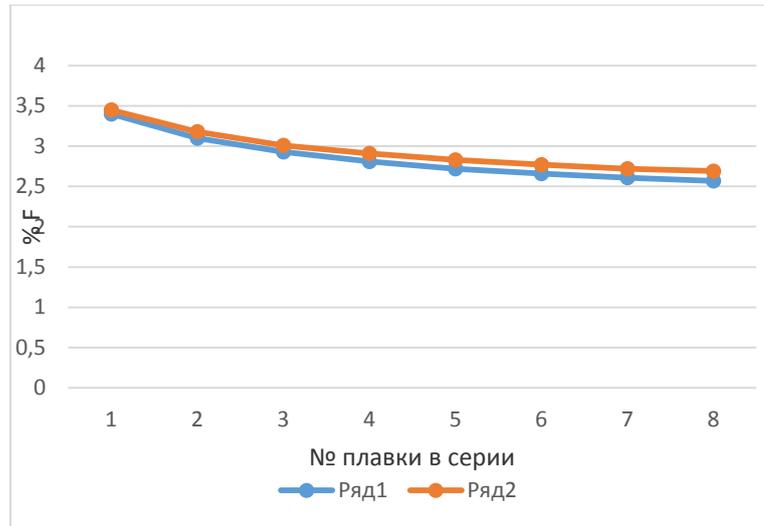


Рисунок 54. Изменение содержания F-иона в шлаке промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

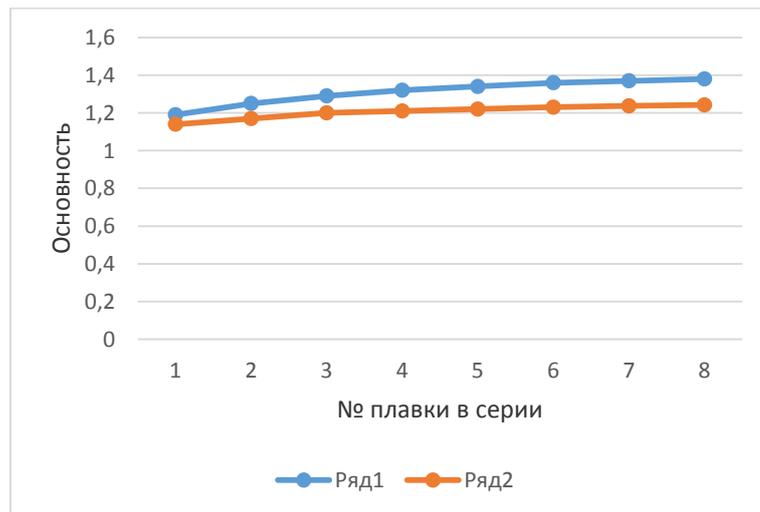


Рисунок 55. Изменение основности шлака промежуточного ковша при переходе от плавки к плавке в серии из восьми плавков: ряд 1 – 100 кг ШОС П-4ск, ряд 2 – 200 кг ШОС П-4ск

Анализ рисунков 50-55 показывает предпочтительность подачи в стальковш 200кг разработанной смеси против 100 кг, т.к. при этом на протяжении разливки серии плавков значительно стабильнее химический состав шлака в промежуточном ковше и, следовательно, стабильнее вязкость, температура плавления и ассимилирующая способность.

Таким образом нами показано, что наилучшие результаты по ассимиляции неметаллических включений в промежуточном ковше достигаются при максимальном скачивании высокоосновного шлака из стальной ковша до остатка в 500 кг (ограничено техническими возможностями) и отдаче максимальной навески смеси П-4ск в 200 кг (ограничено экономическими соображениями).

Глава 5. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

5.1. Теоретическое обоснование

В ЭСПЦ АО «ВТЗ» на четырехручьевой МНЛЗ применялся Т-образный стопорный промежуточный ковш без дополнительных рафинировочных устройств. Использование такого промежуточного ковша приводило к попаданию неметаллических включений в кристаллизаторы МНЛЗ, так как в промежуточном ковше формировался скоростной придонный поток и время нахождения металла в промежуточном ковше было недостаточно для всплывания даже крупных (50...100 мкм) неметаллических включений. В таком промежуточном ковше улучшение рафинирующих свойств покровного шлака не приводило к значительному изменению чистоты стали, так как неметаллические включения попадали в кристаллизатор, не взаимодействуя с покровным шлаком.

Поэтому появилась необходимость в замедлении скоростного придонного потока путём удлинения его траектории за счёт изменения архитектуры промежуточного ковша, введения на пути металла преград (рафинирующих элементов) той или иной конфигурации.

Архитектура промежуточного ковша, обеспечивающая достаточное замедление придонного потока, едва ли может быть найдена прямым путём в результате вычислений, безразлично аналитических или численных. Однако задача замедления придонного потока может быть решена обратным путём – простым перебором тех или иных архитектур промежуточного ковша, одна или несколько из которых обеспечат должное замедление.

По очевидным причинам, связанным с издержками и рисками, этот перебор вариантов не может быть реализован в рамках промышленного эксперимента, но может быть реализован как численный эксперимент или натурный эксперимент на холодной гидравлической модели.

Несмотря на впечатляющее развитие современных вычислительных средств, расчёт одного варианта архитектуры промежуточного ковша с помощью современных программно-вычислительных комплексов (ПВК, например ANSYS) может занять несколько часов, тогда как перестановка перегородок на холодной модели требует лишь нескольких минут. Поскольку в данном случае существует объективная необходимость перебора большого числа вариантов архитектур (ниже в качестве результата исследований будет показано движение жидкости лишь в одной архитектуре, оказавшееся приемлемой), то натурный эксперимент на холодной гидравлической модели следует предпочесть численному эксперименту.

Цель холодного моделирования т.о. будет сводиться к подбору архитектуры промежуточного ковша, обеспечивающей достаточно низкую для всплытия частиц скорость придонного потока или, что, то же самое, достаточно большое время прохождения металла от выходного сечения защитной трубы до входного сечения разливочного стакана.

В настоящей диссертации, аналогично работе [89], проведено гидравлическое моделирование промежуточного ковша с различными рафинирующими элементами по методике Государственного нижегородского политехнического университета и методике ООО «КОРАД» [83].

Основным вопросом идентичности модели и объекта при холодном моделировании течения металла является выбор критериев подобия и масштаба моделирования.

Для решения этого вопроса рассмотрим уравнения, описывающие движение металла в промежуточном ковше, а также граничные условия, но прежде всего сделаем необходимые допущения:

- металл следует считать несжимаемой жидкостью;
- металл следует считать ньютоновской жидкостью;
- вязкость металла следует считать постоянной;
- эффекты, связанные с поверхностным натяжением (например, разную кривизну менисков жидкости объекта и модели) следует игнорировать;

- влиянием свободной конвекции на движение металла следует пренебречь (это оправдано благодаря наличию теплоизоляции расплава стенками промежуточного ковша и шлаком; значительные градиенты температуры, способствующие развитой свободной конвекции, в таких условиях возникнуть не могут).

В таком случае движение металла будет описываться векторным уравнением Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} = \vec{K} - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \nabla^2 \vec{w} \quad (5.1)$$

где \vec{w} – вектор скорости жидкости, проекции которого на координатные оси x, y, z есть u, v, w , м/с;

t – время, с;

\vec{K} – массовая плотность внешней массовой силы, м/с²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

P – давление, Па;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

и скалярным уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{w}) = 0 \quad (5.2)$$

Если течение считать квазистационарным (это оправдано достаточно большой продолжительностью разливки), а от векторной формы уравнения Навье-Стокса перейти к проекциям, то система уравнений (5.1) и (5.2) примет вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.4)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.6)$$

где $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести (прочими внешними массовыми силами, ускорения которых могут входить в вектор \vec{K} , пренебрегаем, по этой причине рассматривается только вертикальная компонента вектора градиента давления).

Для описания граничных условий (начальные условия не рассматриваются в силу квазистационарности течения) рассмотрим схему промежуточного ковша (рис. 56).

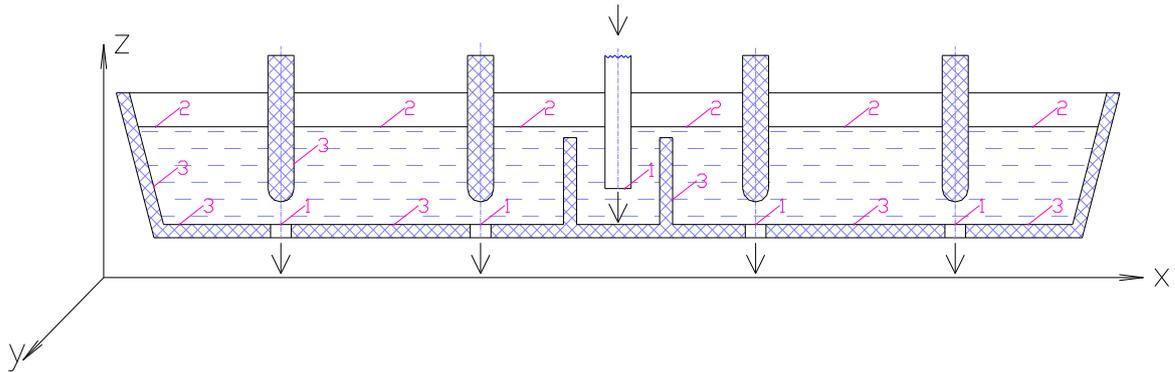


Рисунок 56. Схема промежуточного ковша (направление втекания и вытекания жидкости указано стрелками).

Пространство, в котором течёт металл, замкнуто границами трёх принципиально разных видов (см. обозначения на рисунке 54).

1. Сток/исток металла (границами являются входные/выходные сечения каналов, через которые металл втекает/вытекает).

Если пренебречь неравномерностью распределения скорости по сечениям этих каналов (достаточно оправданное допущение в случае развитой турбулентности), то граничные условия на всех границах 1-го вида будут таковы:

$$u_I=0; v_I=0, w_I=w_{iI}, \quad (5.7)$$

где w_{il} – средняя по сечению скорость жидкости на i -ой границе 1-го вида.

Равенство нулю компонентов скорости u и v есть условие непроницаемости стенок каналов, по которым металл втекает в ковш и вытекает и вытекает из ковша.

Очевидно, что при холодном гидравлическом моделировании граничное условие (5.7) потребует подобия только скоростей w_{il} , условие равенства нулю u_1 и v_1 будет соблюдаться автоматически.

2. Свободная поверхность металла. Граничные условия на этой поверхности будут выглядеть так:

$$u_2 = u_{sl}, \quad v_2 = v_{sl}, \quad w_2 = 0, \quad (5.8)$$

где u_{sl} и v_{sl} – компоненты вектора скорости шлакового расплава на границе раздела шлак-металл, м/с.

Граничное условие для w на этой поверхности есть условие непроницаемости этой поверхности, т.е. отсутствие потоков жидкости поперёк неё. Очевидно, что при холодном гидравлическом моделировании граничное условие $w_2 = 0$ будет соблюдаться автоматически.

Условия $u_2 = u_{sl}$ и $v_2 = v_{sl}$ есть условия отсутствия проскальзывания (аналог условия прилипания на твёрдой стенке) потоков металла и шлака друг относительно друга.

Отметим, что значения u_{sl} и v_{sl} на этой границе неизвестны. Строго говоря, для обеспечения подобия холодной модели моделируемому объекту необходимо обеспечить подобие этих скоростей на свободной поверхности нашей модели и на свободной поверхности промежуточного ковша. Для этого пришлось бы покрыть поверхность жидкости в холодной модели некоей иной жидкостью с меньшей плотностью и иной вязкостью. Кроме того, эта покровная среда должна быть жидкой не полностью. Для обеспечения подобия u_{sl} и v_{sl} покровная среда, подобно

шлаку в промежуточном ковше, должна быть многофазной с переходом от жидкого расплава к твёрдому дисперсному сыпучему материалу.

Отметим, что обеспечить такое подобие сред на холодной модели чрезвычайно сложно, по этой причине вместо шлакового расплава поверхность жидкости в холодной модели будет контактировать с воздухом. Это приведёт к определённым погрешностям при нахождении поля скоростей, величина которых неизвестна, но знак которых можно определить без ошибки.

Поскольку шлаковый расплав на поверхности металла обладает большей вязкостью, чем воздух, то он более интенсивно тормозит потоки металла, нежели чем воздух тормозит потоки модельной жидкости на холодной модели. По этой причине скорости потоков жидкости на модели будут выше, чем при обеспечении полного подобия. Это означает, что полученные моделированием значения скоростей будут заведомо завышены, а времени движения металла – занижены и если они окажутся достаточными для обеспечения всплытия неметаллических включений, то никаких проблем при использовании результатов моделирования в производстве не возникнет.

3. Твёрдые непроницаемые поверхности.

$$u_3=0; v_3=0, w_3=0 \quad (5.9)$$

Граничные условия на границах третьего вида есть условия (в зависимости от расположения поверхности в пространстве) либо непроницаемости, либо прилипания. Подобие таких граничных условиях на модели будет обеспечено автоматически.

Подробное (т.е. для каждой из граничных поверхностей ковша) представление граничных условий (5.7)...(5.9) представляется с одной стороны невозможным – конфигурация твердых поверхностей модели в ходе холодного эксперимента будет изменяться, в этом и заключается суть эксперимента – а с

другой стороны излишним – геометрическое подобие модели промежуточному ковшу будет соблюдено в любом случае, а потому будут подобны и граничные условия (разумеется, если будет соблюдено подобие скоростей на границах первого вида).

Для приведения уравнений (5.3)...(5.6) и граничных условий (5.7)...(5.9) к безразмерному виду, введём масштаб скорости w_0 , м/с – средняя по выходному сечению защитной трубы скорость жидкости, поступающей в промежуточный ковш, а также масштаб координат – d_0 , м – диаметр выходного сечения защитной трубы.

После известных [91] преобразований приведения к безразмерному виду уравнения Навье-Стокса, неразрывности и граничные условия приобретут следующую форму.

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right), \quad (5.10)$$

где $U = \frac{u}{w_0}$; $V = \frac{v}{w_0}$; $W = \frac{w}{w_0}$ – проекции безразмерной скорости на оси x, y, z ;

$X = \frac{x}{d_0}$; $Y = \frac{y}{d_0}$; $Z = \frac{z}{d_0}$ – безразмерные координаты;

$Re = \frac{w_0 d_0}{\nu}$ – критерий Рейнольдса.

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \quad (5.11)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = \frac{1}{Fr} - \frac{\partial Eu}{\partial Z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (5.12)$$

$Fr = \frac{w_0^2}{g d_0}$ – критерий Фруда;

$Eu = \frac{P}{\rho w_0^2}$ – критерий Эйлера;

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (5.13)$$

Для границ 1-го вида:

$$U_1=0; V_1=0;$$

в т.ч. для выходного сечения защитной трубы:

$$W_{1p} = w_0/w_0 = 1 \quad (5.14)$$

в т.ч. для входного сечения каждого из четырёх разливочных стаканов (исходя из равенства втекающего через защитную трубу и вытекающего через все разливочные стаканы расхода жидкости):

$$W_{1g} = \frac{w_g}{w_0} = \frac{\pi \frac{d_0^2}{4} w_0 \frac{1}{4} \pi d_g^2}{w_0} = \frac{d_0^2}{4d_g^2} \quad (5.15)$$

где d_g – диаметр каждого из четырёх разливочных стаканов, м;

w_g – скорость во входном сечении разливочных стаканов, м/с.

Последнее граничное условие будет автоматически выполнено, если при изготовлении холодной модели не будут нарушены пропорции линейных размеров её деталей, в т.ч. подводящих и отводящих каналов.

Для границ 2-го вида:

$$U_2 = \frac{u_{sl}}{w_0}; \quad (5.16)$$

$$V_2 = \frac{v_{sl}}{w_0}; \quad (5.17)$$

$$W_2 = 0 \quad (5.18)$$

Для границ 3-го вида:

$$U_3 = 0 \quad (5.19)$$

$$V_3 = 0 \quad (5.20)$$

$$W_3 = 0 \quad (5.21)$$

Т.о. получены зависимости следующего вида:

$$U=U(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g});$$

$$V=V(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g});$$

$$W=W(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g});$$

$$Eu=Eu(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g});$$

$$U_2= U_2(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g});$$

$$V_2= V_2(X,Y,Z, Re,Fr,W_{1g}),$$

в которой искомыми величинами являются U, V, W, Eu, U_2, V_2 , причём для решения поставленной задачи интерес представляет только поле скоростей, но не давлений.

Re и Fr являются параметрами задачи, а X, Y, Z – независимыми переменными.

W_{1p} (равная единице) и нулевые значения безразмерных скоростей, следующие из граничных условий, строго говоря тоже являются параметрами задачи, но нарушить соблюдение значений этих параметров при моделировании невозможно, а потому их отдельное рассмотрение в качестве параметров холодной гидравлической модели не является необходимым.

Граничное условие (5.15), как уже было сказано, будет соблюдено при соблюдении геометрического подобия модели объекту.

Итак, холодная модель будет подобна объекту моделирования, т.е. безразмерные скорости в сходственных точках модели и объекта моделирования будут равны, если будут соблюдены следующие условия:

$$Re=idem; Fr=idem; W_{1g}=idem$$

Рассмотрим, какие ограничения накладывает на размеры холодной модели соблюдение подобия Re и Fr одновременно.

Поскольку $Re = \frac{w_0 d_0}{\nu}$, а $Fr = \frac{w_0^2}{g d_0}$, то после простейшей подстановки получим выражение для скорости стали, вытекающей из защитной трубы:

$$w_0 = \sqrt[3]{g\nu Re Fr} \quad (5.22)$$

причём из требований подобия Re и Fr следует выражение для скорости модельной жидкости в холодной модели:

$$\dot{w}_0 = \sqrt[3]{g\nu\dot{R}e\dot{F}r} \quad (5.23)$$

поскольку

$$Re = \dot{R}e; Fr = \dot{F}r \quad (5.24)$$

(здесь и далее величины, обозначенные штрихом, относятся к модели, а без такового обозначения – к объекту моделирования).

Вычислим скорость вытекания металла из выходного сечения защитной трубы

$$w_0 = \frac{m}{\rho\tau} \frac{4}{\pi d_0^2} = \frac{147000}{7000 \cdot 65 \cdot 60} \cdot \frac{4}{3,14 \cdot 0,066^2} = 1,57 \text{ м/с} \quad (5.25)$$

где $m=147000$ кг – средняя масса разливаемой плавки;

$\rho=7000$ кг/м³ – плотность жидкой стали;

$\tau=65$ мин – среднее время разливки одной плавки;

$d_0=0,066$ м – диаметр выходного сечения защитной трубы;

Найдём значения критерия Re для моделируемого объекта.

$$Re = \frac{w_0 d_0}{\nu} = \frac{1,57 \cdot 0,066}{6,3 \cdot 10^{-7}} = 94934 \quad (5.26)$$

где $\nu=6,3 \cdot 10^{-7}$ м²/с – вязкость жидкой стали.

Вычислим значения критерия Fr для моделируемого объекта.

$$Fr = \frac{w_0^2}{g d_0} = \frac{1,57^2}{9,81 \cdot 0,066} = 3,83 \quad (5.27)$$

Найдём скорость модельной жидкости (будем считать, что это вода) в выходном сечении защитной трубы холодной модели из соотношений (5.23) и (5.24):

$$\dot{w}_0 = \sqrt[3]{g\nu\dot{R}e\dot{F}r} = \sqrt[3]{9,81 \cdot 0,93 \cdot 10^{-6} \cdot 94934 \cdot 3,83} = 1,49 \text{ м/с} \quad (5.28)$$

В таком случае диаметр выходного сечения защитной трубы на холодной модели должен быть равен:

$$d_0 = \frac{\dot{v}Re}{\dot{w}_0} = \frac{0,93 \cdot 10^{-6} \cdot 94934}{1,49} = 0,059 \text{ м} \quad (5.29)$$

Линейный масштаб при этом составит

$$k_L = \frac{d_0}{\dot{d}_0} = \frac{0,066}{0,059} = 1,14 \quad (5.30)$$

Т.о. речь идёт о моделировании практически 1:1. При длине полости промежуточного ковша 6,133 м длина полости модели составит всего лишь в 1,14 раз меньше, т.е. 5,5 м. Создание столь крупной модели является не только дорогостоящим, но и нецелесообразным при данной постановке задачи мероприятием. Холодное гидравлическое моделирование было выбрано в качестве методике исследования только ради возможности быстрого перебора большого количества вариантов архитектуры промежуточного ковша; очевидно, что на столь крупной модели это малореализуемо.

Столкнувшись с такими затруднениями, следует отказаться от одновременного соблюдения подобия критериев Рейнольдса и Фруда, которое привело к необходимости моделирования в масштабе практически 1:1 и создать такую холодную модель, в которой будет соблюдаться подобие только критерия Рейнольдса, но которая, тем не менее, будет обладать полем скоростей, подобным полю скоростей в промежуточном ковше.

Критерий Фруда, как известно, есть отношение порядков сил инерции и внешней массовой силы, в качестве которой чаще всего, как и в нашем случае, выступает сила тяжести. При необходимости добиться автомодельности течения в холодной модели относительно Fr , невозможно, разумеется, повлиять на силу тяжести, но можно добиться того, чтобы жидкость втекала в модель и вытекала из неё не свободно под действием гравитации, но принудительно под действием насосов.

В таком случае течение может быть автомодельно относительно критерия Фруда, но при этом подобно течению в моделируемом объекте, а параметрами задачи станут только Re и W_{lg} .

Разумеется, при этом должно быть соблюдено геометрическое подобие модели и моделируемого объекта, в данной работе из конструктивных соображений выбран другой линейный масштаб – 1:10.

Тогда $d_0 = 0,1d_0 = 0,1 \cdot 0,066 = 0,0066$ м

$$\dot{w}_0 = \frac{\dot{v}Re}{d_0} = \frac{0,93 \cdot 10^{-6} \cdot 94934}{0,0066} = 13,38 \text{ м/с},$$

а масштаб скоростей составит

$$k_w = \frac{w_0}{\dot{w}_0} = \frac{1,57}{13,38} = 0,12$$

Расход воды на холодной модели будет равен

$$\dot{V}_0 = \dot{w}_0 \frac{\pi d_0^2}{4} = 13,38 \frac{3,14 \cdot 0,0066^2}{4} = 0,00046 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 1,65 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Столь малый расход воды вполне допустим для водопроводной сети, к которой подключена лаборатория, а потому необходимости в обеспечении модели оборотной водой нет. Это важный момент, поскольку при использовании оборотного водоснабжения модели из воды пришлось бы удалять краситель, используемый для визуализации потоков (подробнее см. ниже).

Подача расхода \dot{V}_0 через трубу диаметром 6,6 мм не представляется затруднительной, поскольку избыточное давление поступающей воды может при необходимости повышено до любых разумных пределов, но откачка воды насосом из холодной модели через разливочные стаканы может оказаться невозможной, если их гидравлическое сопротивление окажется более 1 атм (с учётом запаса, рекомендуемого производителями насосов, данное ограничение составляет 0,8 атм).

Рассчитаем гидравлическое сопротивление любого из четырёх разливочных стаканов

$$\Delta P_g = (\xi_{in} + \xi_{out}) \frac{\rho \left(\frac{4\dot{V}_0}{4\pi d_g^2} \right)^2}{2} = (0,2 + 0,6) \frac{1000 \left(\frac{4 \cdot 0,00046}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,0038^2} \right)^2}{2} = 40692 \text{ Па}$$

где $\xi_{in} = 0,2$ – коэффициент местного сопротивления при входе в канал с закруглёнными краями;

$$\xi_{in} = \left(1 - \frac{d_g^2}{d_p^2}\right)^2 = \left(1 - \frac{0,0038^2}{0,01^2}\right)^2 = 0,6 \quad - \quad \text{коэффициент местного}$$

сопротивления при выходе из канала разливочного стакана модели в подключённую к насосу трубку, вычисленный согласно теореме Борда;

$$d_g = 0,038 \text{ м} - \text{диаметр канала разливочного стакана модели};$$

$d_p = 0,01 \text{ м}$ – внутренний диаметр трубки, с помощью которой каждый разливочный стакан подключён к отсасывающему насосу;

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3 - \text{плотность модельной жидкости (воды)}.$$

Поскольку гидравлическое сопротивление ΔP_g оказалось существенно меньше предельно допустимого значения 0,8 атм, то поставленная выше задача организации движения воды в полости холодной модели не под действием гравитации, но под действием подающего и отсасывающего насосов вполне осуществима. Однако с учётом падения производительности насоса при наличии сопротивлений во всасывающем тракте целесообразно выбрать насос с номинальным расходом по крайней мере вдвое больше \dot{V}_0 . В качестве такового был использован центробежный насос Speroni CAM100 с производительностью 3,6 м³/ч при давлении 2,2 атм. Поскольку в ходе экспериментов насос работает при полном отсутствии давления после себя (вода сбрасывается в дренаж), его производительность несколько избыточна и отвод воды из модели регулируется краном. Пробные испытания модели показали, что в подающем насосе нет необходимости – давления в водопроводной сети оказалось достаточно для создания расхода \dot{V}_0 .

Гидравлическая схема холодной модели с учётом описанных решений выглядит следующим образом рисунок 57:

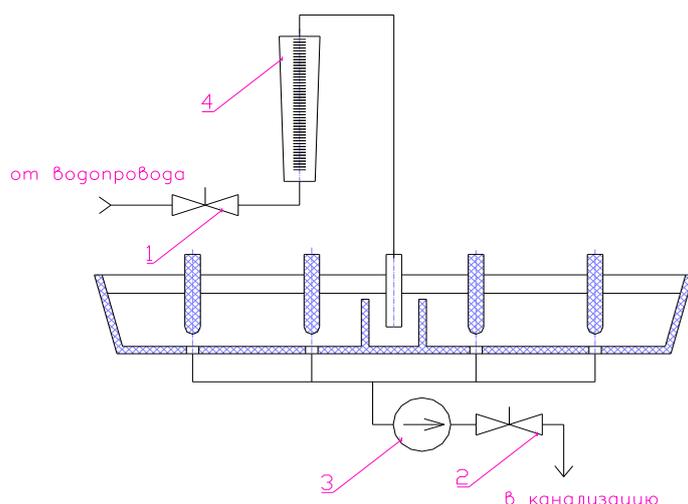


Рисунок 57. Гидравлическая схема холодной модели. 1,3 – игольчатые вентили; 3 – насос; 4 – поплавковый ротаметр Georg Fischer с пределом измерений $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

5.2. Моделирование промежуточного ковша и проведение промышленных испытаний

Из плексигласа была изготовлена модель металлоприемного устройства для приемной части Т-образного промежуточного ковша рисунок 58. В металлоприемном устройстве были проделаны отверстия под углом друг к другу для оптимизации распределения потоков металла в разливочной емкости промежуточного ковша. Металлоприемное устройство устанавливали в приемную емкость промежуточного ковша, и промежуточный ковш снабжали дополнительными порогами рисунок 61.



Рисунок 58. Модель промежуточного ковша

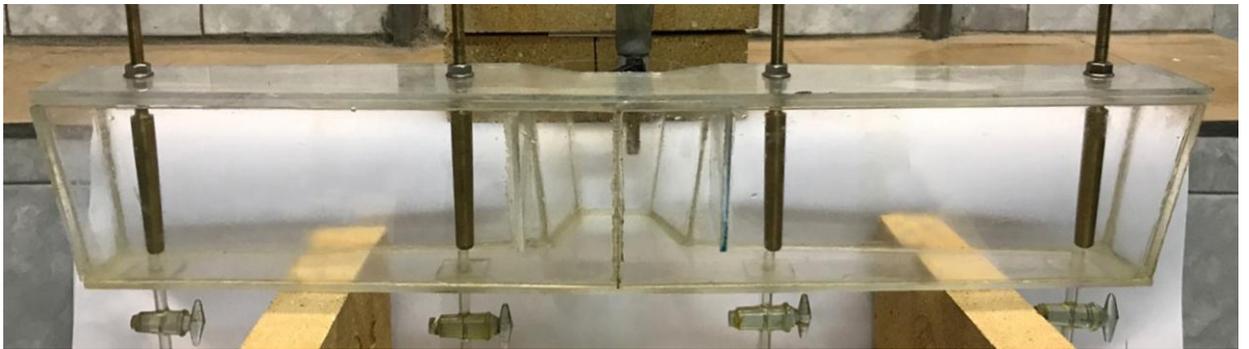


Рисунок 59. Установка для моделирования

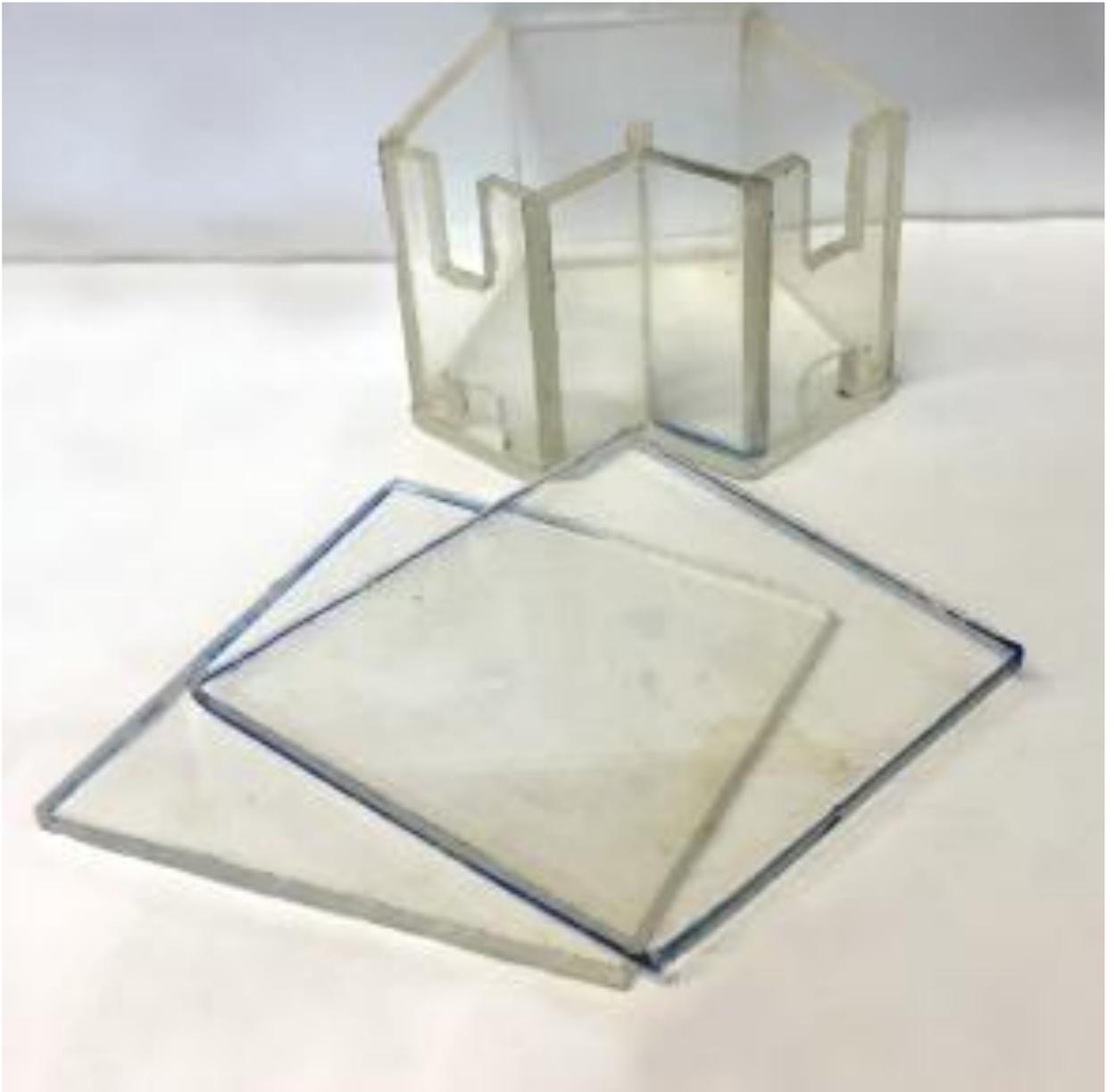


Рисунок 60. Модель турбостопа и порогов



Рисунок 61. Модельная геометрия промежуточного ковша

Эксперименты проводили следующим образом. Открывали игольчатый вентиль 1 рисунок 57, одновременно включая насос 3 при полностью открытом игольчатом вентиле 2. Маховик игольчатого вентиля 1 вращали до тех пор, пока на ротаметре 4 не установятся показания расхода, равного V_0 . Затем, плавно закрывая игольчатый вентиль 2, добивались накопления воды в полости модели на уровне, подобном уровню стали в промежуточном ковше с учётом масштабного фактора 1:10.

После стабилизации уровня воды квазистационарный режим считали наступившим и переходили к измерению скорости при тех или иных архитектурах модели. Скорость потоков определяли методом трассировки, добавляя в воду несколько кристаллов перманганата калия.

Картина распределения потоков жидкости в модели промежуточного ковша показана на рисунках 62–65.



Рисунок 62. Картина распределения потоков в первую секунду после добавления перманганата калия



Рисунок 63. Картина распределения потоков через 7 с после добавления перманганата калия



Рисунок 64. Картина распределения потоков через 15 с после добавления перманганата калия



Рисунок 65. Картина распределения потоков через 18 с после добавления перманганата калия

Удалось добиться средней скорости потока $0,0046$ м/с (в пересчете на сталь с использованием масштаба скоростей k_w), т.е. для дальних разливочных отверстий время нахождения металла в промежуточном ковше превышает 8 мин, что приемлемо для всплывания неметаллических включений.

При разливке металла без применения турбостопа, перегородок со щелевым отверстием и порогов в металле встречались неметаллические включения, по составу идентичные покровному шлаку промежуточного ковша. Это происходило из-за отрыва шлака потоком металла с локальной скоростью, превышающей $0,16$ м/с [90]. Применение разработанной конструкции исключило превышение локальной скорости $0,16$ м/с (локальная скорость на поверхности раздела составляла $0,10...0,15$ м/с).

На основании моделирования разработана огнеупорная футеровка промежуточного ковша. Конструкция футеровки позволила увеличить емкость

промежуточного ковша и поднять уровень металла при стационарных и переходных режимах разливки с 700 до 900 мм, что позволило избежать затягивания шлака промежуточного ковша в вихревую воронку, образующуюся при снижении уровня металла во время смены сталеразливочного ковша [87]. Попадание шлака промежуточного ковша в кристаллизатор меняет свойства шлака на поверхности кристаллизатора, что приводит к дефектам поверхности заготовки и увеличению количества неметаллических включений в металле из-за снижения ассимилирующих свойств шлака кристаллизатора. Были изготовлены металлоприемные устройства, перегородки со щелевым отверстием и пороги рисунки 66–69.



Рисунок 66. Огнеупорная футеровка промежуточного ковша (вид сбоку сверху) с порогами и перегородками со щелевым отверстием



Рисунок 67. Установленное металлоприемное устройство разработанной конструкции



Рисунок 68. Промежуточный ковш после разливки серии плавов



Рисунок 69. Металлоприемное устройство после разливки серии плавов

Во время проведения опытно-промышленного эксперимента был применен весь комплекс разработанных технических решений: скачивание шлака сталеразливочного ковша, применение разработанной рафинирующей смеси для добавления в сталеразливочный ковш в процессе вакуумной обработки и промежуточный ковш с разработанной геометрией внутренней полости с применением турбостопа с двумя угловыми отверстиями, перегородок со щелевым отверстием и порогов. Одновременное применение технических решений объясняется тем, что технология носит комплексный характер, и нельзя исключить отдельный элемент технологии, не нарушив положительный результат.

В результате применения комплексной технологии на 50 % уменьшилось содержание неметаллических включений в металле и на 90 % снизился выход из строя погружных стаканов кристаллизатора из-за их зарастания. Также повысился выход годного из-за снижения немерных заготовок, когда при замене погружного стакана из-за снижения скорости образуется дефект «пояс», который в дальнейшем вырезается из заготовки.

Глава 6. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ С НОРМИРУЕМЫМ НИЖНИМ ПРЕДЕЛОМ СОДЕРЖАНИЯ АЛЮМИНИЯ И СЕРЫ

По результатам исследований была разработана и внедрена следующая технология выплавки и внепечной обработки стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы марки С45Е.

Выплавка стали марки С45Е осуществляется в 150-т основной дуговой печи с газокислородными горелками. Шихтовка плавки состоит из трех корзин стального лома. По достижении температуры ванны 1530...1560 °С начинается окислительный период плавки. После достижения температуры металла 1570...1600 °С проводится скачивание шлака. Содержание углерода перед выпуском из печи – не менее 0,07 %. Уровень активности кислорода – не более 800 ppm. При выпуске в ковш присаживают: 150...200 кг брикетированного алюминия; 200...250 кг карбида кремния, ферросплавы и антрацит на нижний предел содержания элементов в марке; известь 1000...1500 кг; алюмокорундовую смесь ММКН-75 в количестве 250...350 кг. Выпуск плавки осуществляется в сталеразливочный ковш с ошлакованной огнеупорной футеровкой.

Внепечная обработка проводится на двух установках ковш-печь последовательно с непрерывным перемешиванием металла аргоном. После отдачи основного количества ферросплавов и 200...400 кг извести проводится десульфурация, содержание серы перед подачей ковша на вакуумную установку 0,002-0,005. Суммарное количество песка 250...300 кг. Содержание алюминия в металле в процессе обработки поддерживается в пределах 0,015...0,022 %. Содержание алюминия перед подачей ковша на вакуумную установку – в пределах 0,030...0,035 %.

После обработки металла на установках ковш-печь № 1 и ковш-печь № 2 производится слив излишков шлака в шлаковую чашу до достижения слоя шлака в сталеразливочном ковше толщиной не более 50 мм. После постановки

сталеразливочного ковша в камеру вакууматора производится отдача ассимилирующей ШОС П4ск в количестве 180...220 кг. Далее камера вакууматора накрывается крышкой и производится непосредственно вакуумная обработка. Обработка происходит под глубоким вакуумом (давление в вакуум-камере менее 1,5 мБар) с применением донной продувки аргоном при длительности не менее 15 мин. После сброса вакуума и поднятия крышки, при помощи трайб-аппарата, производится присадка порошковой проволоки с наполнителями из Al. После присадки алюминиевой катанки в течение 2...3 мин производится усреднительная продувка металла аргоном (содержание алюминия перед разливкой составляет 0,020...0,026 %). Далее производится обработка металла порошковой проволокой с наполнителем из SiCa (содержание кальция перед разливкой составляет 0,0020...0,0030 %). После ввода кальцийсодержащей проволоки в течение 5...10 мин производится усреднительная продувка металла аргоном. Затем происходит обработка стали порошковой проволокой с наполнителем из серы (содержание серы перед разливкой составляет не более 0,004 % выше нижнего марочного предела). После присадки серосодержащей проволоки металл не менее 3...4 мин перемешивается аргоном. Производится отбор проб на химический анализ и содержание азота в металле, а также проба шлака. После чего продувка металла аргоном прекращается. Перед отправкой металла на разливку производится присадка рисовой лузги в количестве 170...180 кг. Для исключения снижения температуры металла в сталеразливочном ковше время от момента последнего измерения температуры после окончания вакуумной обработки до начала разливки плавки не должно превышать 20 мин.

Промышленное применение технологии с добавлением перед вакуумированием стали 200 кг разработанной ШОС П4ск привело к значительному росту серийности разливки (таблица 18).

Таблица 18. Сравнение вариантов технологии с применением ШОС П4ск (опытная) и без применения ШОС П4ск (сравнительная)

<i>Внепечная обработка стали без применения ШОС П-4ск в сталеразливочном ковше</i>		
Число разлитых плавков	Число замен стаканов	Число замен погружных стаканов, приходящихся на 1 плавку
81	176	2,17
<i>Внепечная обработка стали с применением ШОС П-4ск в сталеразливочном ковше</i>		
Число разлитых плавков	Число замен стаканов	Число замен погружных стаканов, приходящихся на 1 плавку
574	211	0,37

Применение разработанной ШОС позволило в 5,86 раза снизить средний показатель по числу замен стаканов, приходящихся на одну плавку.

Глава 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Экономическая эффективность новой технологии производства стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы, заключается в уменьшении возврата металла и перевода металла в отходы непрерывной разливки стали, а также в экономии огнеупоров благодаря снижению затягивания канала погружных стаканов. Дополнительные затраты для реализации технологии – стоимость разработанной шлакообразующей смеси П-4ск. Экономический расчет представлен в таблице 19.

Таблица 19. Экономический расчет эффективности применения смеси П-4ск

Наименование	Цена, руб/т	Расход на 1 т, руб/т	Затраты на 1 т, руб/т
<i>Действующие нормативы на 2015 г. (до введения новой технологии)</i>			
ШОС П-4 (п/к)	10894,91	0,82	8,9
Доп. отдача на ВКР ШОС П-4	10894,91		0
Материал муллитокорундовый ММКН75	24777,41	4,76	117,9
Доп. отдача на ВКР ММКН75	24777,41		0
Всего материалов		5,58	126,9
Потери от перевода в отходы НЛЗ	14489,47	30,7	444,8
Итого		36,28	571,7
<i>Фактически за I полугодие 2015 г. (до введения новой технологии)</i>			
Доп. отдача на ВКР ШОС П-4	10894,91	0,69	7,5
Доп. отдача на ВКР ММКН75	24777,41	0,93	23,0
Всего материалов		1,62	30,6
Потери от перевода в отходы НЛЗ		27,1	392,7
Итого	14489,47	28,72	423,2
<i>Фактически по программе испытаний ШОС П-4ск</i>			
Доп. отдача на ВКР ШОС	10894,91		0

Наименование	Цена, руб/т	Расход на 1 т, руб/т	Затраты на 1 т, руб/т
П-4			
Доп. отдача на ВКР ММКН75	24777,41		0
ШОС П-4скЗ	14474,58	1,33	19,3
Всего материалов		1,33	19,3
Итого	14489,47	20,57	297,8
		21,9	317,1
<i>Экономический эффект при фактических данных за I полугодие 2015 г., в том числе:</i>			106,2
экономии добавочных материалов			11,3
перевода в отходы НЛЗ			94,6

При годовом производстве стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы 300 000 т/год экономический эффект от внедрения ШОС П-4ск составит 31 860 000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что при разливке среднеуглеродистых низколегированных сталей с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы в процессе зарастания погружных стаканов алюминатами и сульфидами, преобладающую роль играют сульфиды. Внесены изменения в технологию внепечной обработки стали С45Е, позволившие повысить ее разливаемость.
2. Развиты представления о существенном влиянии шлака сталеразливочного ковша на состав и свойства шлака промежуточного ковша применительно к условиям разливки среднеуглеродистой низколегированной стали с нормируемым нижним пределом алюминия и серы. Показано, что при высокой основности шлака сталеразливочного ковша (2,5-3,0) меняется химический состав и рафинирующая способность шлака промежуточного ковша за счет попадания шлака сталеразливочного ковша в промежуточный ковш в конце разливки каждой плавки в серии.
3. Уточнены области концентраций алюминия и серы, при которых наблюдается перераспределение состава неметаллических включений в сторону большего количества алюминатов кальция и снижения его сульфидов. При уменьшении содержания алюминия от 0,050 до 0,020 % и серы от 0,035 до 0,020 % количество связанного в сульфиды кальция снижается примерно в три раза - с 0,0080 до 0,0030 %, а количество кальция, связанного в оксиды, возрастает с 0,0050 до 0,0100 %, что обеспечивает лучшую разливаемость стали.
4. Предложен алгоритм разработки химических и компонентных составов шлакообразующих смесей для сталеразливочного ковша при непрерывной разливке стали С45Е, которые гарантируют высокую рафинирующую способность шлака промежуточного ковша на протяжении разливки всей серии плавков. С помощью разработанной расчетной программы и численных зависимостей, для заданных физико-химических характеристик расплава шлака определяется необходимый химический состав ШОС, а затем для этого

химического состава определяется компонентный состав, с одновременным расчетом себестоимости.

5. С использованием предложенного алгоритма и расчетной программы разработан состав шлакообразующей смеси для сталеразливочного ковша, которая при попадании в промежуточный ковш не ухудшает рафинирующую способность шлака промежуточного ковша в течение разливки всей серии плавов. Портландцемент ПЦ 500 – 34%, сиенит 15%, формовочный песок 36%, углерод искусственный 5%, отходы огнеупоров ($MgO+SiO_2$) 10%.
6. Определено максимальное количество остатка жидкого шлака в сталеразливочном ковше после его скачивания перед подачей на вакуумную установку (до 50 мм) и необходимая масса добавки шлакообразующей смеси в сталеразливочный ковш после вакуумирования (180-200кг), обеспечивающей при серийной разливке сохранение ассимилирующих свойств шлака в промежуточном ковше.
7. По результатам физического моделирования потоков в промежуточном ковше изменена его конструкция, что позволило увеличить емкость с 22 до 27 т и поднять уровень металла с 700 до 900 мм. Внедрена новая конструкция металлоприемного устройства, позволившая снизить локальные скорости металла у границы металл-шлак и повысить ассимилирующие свойства шлака.
8. Разработана и внедрена технология производства стали с нормируемым нижним пределом содержания серы и алюминия, позволившая повысить долю алюминатов кальция и снизить долю его сульфидов в неметаллических включениях, что позволило уменьшить зарастание разливочных стаканов и снизить количество замен стаканов в среднем с 2,17 до 0,37 на плавку.
9. Годовой экономический эффект от внедрения новой ШОС для сталеразливочного ковша составил 31 860 000 рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Н., Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан . – Алчевск: ДонДТУ, 2010. – 520 с.
2. Гаук Ф., Износ погружных стаканов и образование отложений глинозема при непрерывной разливке стали / Ф. Гаук, Ю. Петшке // Огнеупоры для МНЛЗ: Труды конференции. – М.: Metallurgia, 1986. – С.62-75.
3. Pfyl A., Operation of a 3-plate tundish gate for slab casters with non-stop SN-change at ISPAT Mexicana in Lazaro Cardenas / Mexico Pfyl A., Fernandez J., Nieto J // Proceedings 3rd European Conference of Continuous Casting. Madrid-Spain, October 20-23, 1998. – Madrid: 1998. – P.667-667.
4. Смирнов А.Н., Развитие металлургического мини-завода ООО «Электросталь» и повышение его производительности / А.Н.Смирнов, А.С.Хобта, А.И.Смирнов и др. // Сталь. 2011. №1. – С.34-37.
5. Явойский, В.И. Включения и газы в стали. / В.И. Явойский, С.А. Близнюков, А.Ф. Вишкарев и др. – М. : Metallurgia, 1979. – 272 с.
6. Милз, К. Обзор исследований свойств и выполняемых функций ШОС, используемых в кристаллизаторе / К. Милз, А. Фокс // Матер. 4-й Европ. Конф. (Бирмингем, Англия. 14 окт. 2002.). С. 342–349.
7. Turkdogan, E.T. Physical properties of Molten Slags and Glasses / E.T.Turkdogan. – London : Metal Society, 1983. 516 p.
8. Rasmussen, P. Improvements to steel cleanliness at Dofasco's No. 2 Melt Shop / P. Rasmussen // 77th Steelmaking Conf. Proc. – ISS, Warrendale, PA, 1994. – P. 219–224
9. Лейтес, А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А.В. Лейтес. – М. : Metallurgia, 1984. – 200 с.
10. Ткачев, П.Н. Влияние шлака промежуточного ковша на загрязненность стали неметаллическими включениями / П.Н. Ткачев, Т.Н. Попова, М.Н. Анюхин //

- Матер. Междунар. конф. «Черная металлургия России и стран СНГ» (Москва. Июнь 1994 г.). – М. : Металлургия, 1993. – Т. 3. – С. 119–120.
11. Старов, Р.В. Изменения химического состава неметаллических включений на всех этапах производства стали / Р. В. Старов, И. В. Дервянченко, В. В. Парусов и др. // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 79–82.
 12. Приходько, Э.В. Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов / Э. В. Приходько // Изв. Академии наук СССР. Сер. Неорганические материалы. – 1980. – Т. 16. – № 5. – С. 900–906.
 13. Tripathi, N. Effect of ladle age on formation of nonmetallic inclusions in ladle treatment / N. Tripathi, M. Nzotta, A.Sandberg // Ironmaking and Steelmaking. – 2004. – Vol. 31. – No. 3. – P. 235–240.
 14. Sader, M. Inclusion growth and removal in Gas-Stirred ladles / M. Sader, P. Fonsson, L. Sonsson // Steel Research Int. – 2004. – Vol. 75. – No. 2. – P. 128–136.
 15. Jungreithmeier, A. Production of UL CIF Steel Grades at Voist-Alpine Stahl GmbH / A. Jungreithmeier, E. Pessenberger, K. Burgstaller // Iron and Steel Technology. – 2004. – Vol. 1. – No. 4. – P. 41–48.
 16. Куклев, А.В. Практика непрерывной разливки стали / А.В. Куклев, А.В. Лейтес. – М. : Металлургиздат, 2011. – 432 с.
 17. Тёнсхоф, Г.К. Металлургический эффект, достигаемый при обработке кальцием стали на МНЛЗ / Г.К. Тёнсхоф, В. Кестнер, Р. Шнадт // Черные металлы. – 2007. – № 8. – С. 28–35.
 18. Хо, Б. Повышение степени чистоты стали при непрерывной разливке / Хо Б., Якоби Х., Вимер Х.-А., Вюнненберг К. // Черные металлы. – 1989. – № 2. – С. 22–29.
 19. Дюдкин, Д.А. Обеспечение разливаемости на МНЛЗ алюминием раскисленных сталей / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко // Матер. Конф. «50 лет непрерывной разливки стали на Украине» (Донецк. 4–5 ноября 2010).

[Электронный ресурс] Режим доступа :

<http://uas.su/conferences/2010/50let/26/00026.php>

20. Аксельрод, Л.М. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали / Л.М. Аксельрод, В.М. Паршин, Е.Ф. Мазуров // Сталь. – 2007. – № 4. – С. 30–33.
21. Kijas, J. The current status of tundish covering slags in a slab caster plant / J. Kijas, Kovac P., Steranka E. [et al.] // Metalurgija. – 2004. – Vol. 43. – No. 1. – P. 59–62.
22. Зайцев, А.И. Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, О.Н. Бакланова [и др.]. – Зайцев, А.И. Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, О.Н. Бакланова [и др.]. – Сб. науч. тр. - практ. семинара М. : Metallurgizdat, 2005. – С. 135–152.
23. Hauder, R. Evaluation and control of steel cleanliness/ R. Hauder, S.Chakraborty // 85th Steelmaking Conference Proceedings : ISS-AIME (Warrendale, PA 2002). – 2002. – pp. 431-452.
24. Горбовский, С.А. Предотвращение зарастания каналов сталеразливочных ковшей / С.А. Горбовский, С.В. Казаков, С.В. Ефимов [и др.] // Сталь. – 2003. – № 12. – С. 16–18.
25. Комшуков, В.П. Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / В.П. Комшуков, Е.В. Протопопов, С.В. Фейлер [и др.] // Тр. X Конгресса сталеплавильщиков : сб. тр. (Магнитогорск. 13–17 октября 2009). – М. : Черметинформация, 2009. – С. 637–640.
26. Шахпазов, Е.Х. / Е.Х.Шахпазов, А.И. Зайцев, И.Г. Родионова [и др.] // Тр. X Конгресса сталеплавильщиков (Магнитогорск. 13–17 октября 2009). – М. : Черметинформация, 2009. – С. 629–637.
27. Аксельрод, Л.М. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ / Л.М. Аксельрод,

- А.А.Вяткин, Н.А. Вяткина [и др.] // Новые огнеупоры. – 2007. – № 2. – С. 9–14.
28. Авадзия, Ю. Prevention of adhesion of alumina inclusions onto submerged entry nozzle by refractory material containing MgO and Al / Ю. Авадзия, М. Судзуки, К. Ватанабе [и др.] // Tetsu-to-Hagane. – 2012. – Vol. 98. – No. 1. – P. 39–42.
29. Минаев, Ю.А. Влияние концентрационных полей на поведение продуктов раскисления стали / Ю.А. Минаев, Ю.И. Уточкин, В.А. Григорян // Изв. Академии наук СССР. Металлы. – 1971. – № 6. – С. 15–17.
30. Prasad, V. Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining/ V. Prasad, Dr. J.K. Sahu, J.N. Tiwari [et al.] // Proc. 5th European Continuous Casting Conference (France. June 20–22, 2005). – 2005. – pp. 134–137.
31. Мазуров, Е.Ф. / Е.Ф. Мазуров, А.Ф. Каблуковский, О.Т. Пикина // Тематич. отрасл. сб. «Теория металлургических процессов». – М. : Металлургия, 1975. – № 3. – С. 231–248.
32. Лукавая, М.С. Анализ процесса затягивания погружных стаканов при непрерывной разливке стали / М.С. Лукавая, Г.Г. Михайлов // Вест. ЮрГУ. Сер. «Металлургия». – 2006. – № 10. – С. 69–72.
33. Fuhr, F. Relationship between nozzle deposits and inclusion composition in the continuous casting of steels / F. Fuhr, C. Cicutti, G. Walter [et al.] // Iron and Steelmaker. – 2003 – Vol. 30. – No. 12. – P.53–58.
34. Croft, T.N., Three-phase computations of the continuous casting process. / Croft, T.N., Pericleous, K.A., Bobadilla, M. and Gardin, P. Proc.// 4th European Continuous Casting Conference, England, UK, 2002 , pp. 545-554.
35. Ludolow, V., Continuous casting mould powder and casting process interaction: why powders do not always work as expected. / Ludolow, V., Harris, B., Riaz, S., and Normanton // A VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, pp. 723-729.
36. B.G.Thomas, Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel / B.G.Thomas, Q.Yuan, L.Zhang, S.P.Vanka // Proceedings of NSF Conference “Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research” ,

- Birmingham, Al, January 6-9, 2003. – University of Alabama: R.G.Reddy, ed., 2003. -P.2328 - 2362.
37. Тиннес Б. Опыт эксплуатации шибберных затворов промежуточных ковшей // Огнеупоры МНЛЗ. Труды конференции. – М.: Metallurgy, 1988. – С.121-130.
 38. Havenga F., Changeover from a 2-plate tundish sliding gate (T70) to a plate tundish sliding gate (33QC-SNS) at the continuous casters V1&V2 of ISCOR's Vanderbijlperk Works in South Africa / F. Havenga, S. Botes // Proceedings 4rd European Continuous Casting Conference. Birmingham, UK, 14-16 October, 2002. – Birmingham: IOM Communication, 2002. – P.112-121.
 39. Fangming Y., Numerical simulation of Al₂O₃ deposition at a nozzle during continuous casting / Yuan Fangming, Wang Xinghua, Zhang Jiongming, Zhang Lifeng. // Univ. Sci. and Technol. Beijing. 2008. 15. No.3. - P.227-235.
 40. Ren, Y. Formation Mechanism of CaO–CaS Inclusions in Pipeline Steels / Y. Ren, L. Zhang, Sh. Li, W. Yang, Y. Wang// Proc. 28 Europ. Continues Casting Conf., 2014, P. 162-164.
 41. Сб. Итоги науки и техники, сер. «Теория металлургических процессов». – 1987. – Т. 6. – С. 84.
 42. Ren, Y. Formation Mechanism of CaO–CaS Inclusions in Pipeline Steels / Y. Ren, L. Zhang, Sh. Li, W. Yang, Y. Wang// Proc. 28 Europ. Continues Casting Conf., 2014, P. 162-164.
 43. Сладкошteeв, В.Т. Качество стали при непрерывной разливке / В.Т. Сладкошteeв, В.Л. Ахтырский, Р.В. Потанин. – М. : Metallurgy, 1973. – 308 с.
 44. Евтеев, Д.П. Непрерывное литье стали / Д.П. Евтеев, Н.Л. Колыбалов. – М. : Metallurgy, 1984. – 200 с.
 45. Сладкошteeв, В.Т. Непрерывная разливки стали на радиальных установках / В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес. – М. : Metallurgy, 1974. – 288 с.

46. Скворцов, А.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М. : Metallurgy, 1991. – 216 с.
47. Исследование непрерывной разливки стали / Под ред. Липа Д.Б., Пер. с англ. – М. : Metallurgy, 1982. – 200 с.
48. Chattopadhyay, K. Physical and Mathematical Modeling of Steelmaking Tundish Operations: A Review of the Last Decade (1999–2009) / K. Chattopadhyay, M. Isac, R. Guthrie // ISIJ International. – 2010. – Vol. 50. – No. 3. – P. 331–348.
49. Смирнов, А.Н. Современные сортовые МНЛЗ: перспективы развития технологии и оборудования / А.Н. Смирнов, А.Л. Подкорытов // Технологии. – 2009. – № 12. – С. 18–25.
50. Смирнов, А.Н. Многофункциональный промковш для разливки чистых сталей / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.А. Сердюков, Тонкушин А.Ф. // Сб. науч. тр. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине» (Донецк. 2010). – С. 409–420.
51. Смирнов, А.Н. Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Писмарев К.Е. Удаление неметаллических включений из стали в промковше при ее продувке аргоном через пористые блоки / А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко, К.Е. Писмарев // Науч. тр. ДонНТУ. Донецк. – 2011. – № 13(194). – С. 80–92.
52. Смирнов, А.Н., Кравченко А.В., Подкорытов А.Л. и др. Оптимизация потоков стали в промковше при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.Л. Подкорытов [и др.] // Сб. науч. тр. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине» (Донецк. 2010). – С. 324–330.
53. Красюк, О.П. О влиянии периклазовых перегородок с кальциевыми фильтрами в промежуточном ковше на распределение неметаллических включений в кордовой катанке / О.П. Красюк, И.А. Бондаренко, А.Н. Чичко // Литье и металлургия : научно-производственный журнал. – 2009. – № 2 (51). – С. 159–163.

54. Sahai, Y. *Tundish Technology For Clean Steel Production* / Y. Sahai, T. Emi. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2008. – Vol. 316. – P. 3.
55. Ефремов, Г.В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / Г.В. Ефремов // *Сталь*. – 2001. – № 4. – С. 28–34.
56. Warzecha, M. CFD modeling of non-metallic inclusions removal process in the T-type tundish / M. Warzecha, T. Merder, P. Warzecha // *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2012. – Vol. 55. – Is. 2. – P. 590–595.
57. Solorio-Diaz, G. Modeling the effects of a swirling flow on temperature stratification of liquid steel and flotation of inclusions in a tundish / G. Solorio-Diaz [et al.] // *ISIJ International*. – 2005. – Vol. 45. – No. 8. – P. 1129–1137.
58. Morales, R.D. Melt flow control in a multistrand tundish using a turbulence inhibitor / R.D. Morales [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2000. – Vol. 31. – No. 6. – P. 1505–1515.
59. López-Ramirez, S. Modeling study of the influence of turbulence inhibitors on the molten steel flow, tracer dispersion, and inclusion trajectories in tundishes / S. López-Ramirez [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2001. – Vol. 32. – No. 4. – P. 615–627.
60. Moumtez, B. Numerical investigation of the fluid flow in continuous casting tundish using analysis of RTD curves / B. Moumtez, A. Bellaouar, K. Talbi // *J. of Iron and Steel Research International*. – 2009. – Vol. 16. – No. 2. – P. 22–29.
61. Seshadri, V. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain / V. Seshadri, C.A. da Silva, I.A. da Silva // *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. – 2012. – Vol. 9. – No. 1. – P. 22–29.
62. Тахаутдинов, Р.С. Использование аргона в промежуточном ковше [Текст] / Р.С. Тахаутдинов, С.Н. Ушаков, С.В. Горосткин [и др.] // *Вест. МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2007. – № 2. – С. 25–27.
63. Wolf, M. Advanced tundish metallurgy in slab casting / M. Wolf // *Proc. 2nd Conf. on Continuous Casting of Steel in Developing Countries (Wuhang, China. October 28–31, 1997)*. P. 316.

64. Манохин, А.И. / А.И. Манохин, О.В. Носоченко, Е.П. Матевосян [и др.] // Сталь. – 1970. – № 12. – С. 121–124.
65. Кац, Я. Энергосберегающая технология регулирования температуры жидкой стали / Я. Кац, В. Кириленко, Ал. Шалимов, Е. Шахпазов // Сталь. – 1997. – № 9. – С. 24–29.
66. Достижения в области непрерывной разливки стали : Тр. межд. конгресса / Пер. с англ. Д.П.Евтеева, И.Н. Колыбалова. – М. : Metallurgy, 1987. – 224 с.
67. Шебаниц, Э.Н. Разработка и испытание двухслойного шлакового покрытия металла в проковше МНЛЗ / Э.Н. Шебаниц, А.А. Ларионов, А.В. Побегайло [и др.] // Тр. V конгр. сталеплавильщиков. М.: «Черметинформация», 1999. С. 434–436.
68. Bessho, N. Removal of inclusions from molten steel in continuous casting tundish / N. Bessho, H. Yamasaki, T. Fujii [et al.] // ISIJ International – 1992. – Vol. 32. – No. 1. – P. 157–163.
69. McLean, A. The turbulent tundish contaminator or refiner / A McLean // Proc. 71st Steelmak. Conf. Vol. 71 (Toronto Mecn. Apr. 17–20, 1988). Warrendale (Pa), 1988. – P. 3–23.
70. Spaccaretella, A. Raffreddamento saplementare del cratere liquido mediante gunta on pulverimetallice in lingottera di colata continua / A. Spaccaretella, G. Di Schino // Boll. Tech. Finsider. – 1981. – No. 390. – S. 21–30.
71. Zhong, L. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers / L. Zhong [et al.] // ISIJ International – 2007. – Vol. 47. – No. 1. – P. 88–94.
72. Braun, A. Numerical and physical modeling of steel flow in a two-strand tundish for different casting conditions / A. Braun, M. Warzecha, H. Pfeifer // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2010. – Vol. 41. – No. 3. – P. 549–559.

73. Merder, T. Numerical modeling of the influence subflux controller of turbulence on steel flow in the tundish / T. Merder, J. Pieprzyca // *Metalurgija*. – 2011. – Vol. 50. – No. 4. – P. 223–226.
74. Yokoya, S. Swirling Flow Effect in Submerged Entry Nozzle on Bulk Flow in High Throughput Slab Continuous Casting Mold / S. Yokoya, S. Takagi, S. Ootani [et al.] // *ISIJ International*. – 2001. – Vol. 41. – No. 10. – P. 1208–1214.
75. Yokoya, S. Swirling Flow Effect in Bottomless Immersion Nozzle on Bulk Flow in High Throughput Slab Continuous Casting Mold / S. Yokoya, S. Takagi, K. Tada [et al.] // *ISIJ International*. – 2001. – Vol. 41. – No. 10. – P. 1201–1207.
76. Либерман, А.Л. Фильтрация стали в процессе непрерывной разливки / А.Л. Либерман, И.В. Дубровин, В.А. Коржавин, В.А. Зубов [и др.] // *Сталь*. – 1992. – № 4. – С. 16–18.
77. *Механика жидкости и газа* / под ред. проф. д-ра техн. наук А.Н. Минаева. – М. : *Металлургия*, 1987. – 301 с.
78. Ozawa, M. / M. Ozawa, I. Otsuka, T. Mori [et al.] // *Japan Society for Promotion of Science*. 19th Committee, 1975. No. 9839. – 57 p.
79. Sanbongi, K. / K. Sanbongi // *Transaction Iron and Steel Institute Japan*. – 1979. – Vol. 19. – No. 1. – P. 1–10.
80. Явойский, В.И. / В.И. Явойский, Л.П. Владимиров, В.П. Лузгин [и др.] // *Изв. Академии наук СССР. Металлы*. – 1974. – № 2. – С. 14–21.
81. Михайлов, Г.Г. Термодинамические принципы оптимизации процессов раскисления стали и модифицирования неметаллических включений : Дис. ... д-ра техн. наук / Г.Г. Михайлов. – Челябинск, 1985. – 181 с.
82. Cho, J., Thermal Resistance between Mold Flux Film and Mold for Continuous Casting of Steels / J. Cho, H. Shibata, T. Emi, M. Suzuki // *ISIJ International*. – 1998. – Vol. 38. – No. 5. – P. 440–446.
83. Тиняков, В.В. Разработка технологии непрерывной разливки стали на основе исследования гидродинамики потоков металла в промежуточном ковше для

- получения высококачественных слябов : Дис. ... канд. техн. наук. / В.В.Тиняков. – М., 2003. – 124 с.
84. Божесков А.Н. Применение стаканов-дозаторов с продувкой аргоном для повышения уровня разливаемости сталей / А.Н. Божесков, В.В. Казаков, А.А. Коростелев [и др.] // Сталь. – 2015. – № 7. – С. 3-15.
85. Коростелев А.А. Опыт применения стопоров-моноблоков с магниальной головной частью / А.А. Коростелев, Н.С. Съёмщиков, А.А. Чернышев, А.Н. Божесков [и др.] // Новые Огнеупоры. – 2016. – №6. – С.3-7.
86. Божесков А.Н. Разработка шлакообразующей смеси для сталеразливочного ковша и технологии ее применения при производстве сталей с повышенным содержанием алюминия и серы / А.Н. Божесков, А.В. Куклев, И.В. Лебедев [и др.] // Metallurg. – 2015. – №11. – С.79-82.
87. Божесков А.Н. Физическое моделирование потоков металла в промежуточном ковше УНРС-2 ЭСПЦ АО «Волжский трубный завод» с целью совершенствования его конструкции/ А.Н. Божесков, А.В. Аленин, В.В. Казаков [и др.] // Metallurg. – 2018. – № 12. – С.39-41.
88. Анисимов К.Н. Выбор расчетной модели вязкости шлакообразующих смесей/ К.Н. Анисимов, М.П. Гусев, А.В. Куклев., А.М. Лонгинов, А.М. Топтыгин, А.Н. Божесков // Теория и технология металлургического производства. – 2018. – № 4. – С.25-29.
89. Вдовин К.Н. Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ/ К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, И.М. Ячиков., // Огнеупоры в тепловых агрегатах. – 2015. – № 11. – С.3-7.
90. Вдовин К.Н. Технология управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ/ К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, В.В. Точилкин // Огнеупоры в тепловых агрегатах. – 2016. – № 2. – С.3-5.
91. Кривандин, В.А. Теплотехника металлургического производства. Том 1/ Теоретические основы //Учебное пособие для вузов. – М.: МИСиС, 2002. – С.608.

Приложение 1



Приложение 2

ИЗ №2600605

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(51) МПК
B22D 11/111 (2006.01)

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 600 605** ⁽¹³⁾ **C1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: превращен в заявку, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса: 19.05.2019)

(21)(22) Заявка: **2015121072/02**, **03.06.2015**(24) Дата начала отчета срока действия патента:
03.06.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **03.06.2015**(45) Опубликовано: **27.10.2016** Бюл. № **30**(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2410193 C1, 27.01.2011. RU 2308351 C1, 20.10.2007. RU 2174893 C1, 20.10.2001. GB 2000198 A, 04.01.1979. SU 102497 A1, 01.01.1956.**

Адрес для переписки:

105005, Москва, а/я 18, ООО "КОРАД", для Хоровского П.А.

(72) Автор(ы):

**Куклев Александр Валентинович (RU),
Топтыгин Андрей Михайлович (RU),
Лебедев Илья Владимирович (RU),
Божесков Алексей Николаевич (RU),
Анисимов Константин Николаевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Общество с ограниченной
ответственностью "КОРАД" (RU)**

(54) ШЛАКООБРАЗУЮЩАЯ СМЕСЬ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ И СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШАХ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии. Шлакообразующая смесь включает следующие ингредиенты, мас. %: порландцемент 20-40, материал на основе окислов кремния 30-50, сиенитовый концентрат 7-18, углеродсодержащий материал 3-7, фторсодержащий материал 1-5, серпентинит 5-15. Обеспечивается повышение ассимиляции неметаллических включений из стали, снижение науглероживания стали и износа футеровки ковша при разливке. За счет отсутствия летучих соединений фтора в воздухе рабочей зоны улучшаются санитарно-гигиенические условия труда персонала. 2 табл.

Изобретение относится к черной металлургии, а именно к составам шлакообразующих смесей, используемых для защиты металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах.

Известна шлакообразующая смесь (Патент RU 2314893 C1, кл. B22D 11/00, 20.01.2006) для защиты поверхности металла в промежуточном ковше машин непрерывного литья сортовых и слябовых заготовок следующего состава:

Углеродсодержащий материал - 21-30%

Материал на основе окислов кремния - 20-50%

Цемент - остальное.

Приложение 3

АКТ

внедрения мероприятий по улучшению разливаемости и качества НЛЗ при производстве марки стали С45Е с повышенным содержанием алюминия и серы в условиях АО «Волжский трубный завод»

Настоящим актом подтверждаем внедрение мероприятий по улучшению разливаемости и качества НЛЗ при производстве марки стали С45Е с повышенным содержанием алюминия и серы на АО «Волжский трубный завод», полученное в рамках диссертации «Разработка технологии производства высокосернистой стали с высоким содержанием алюминия».

Для улучшения разливаемости марки стали С45Е с повышенным содержанием алюминия и серы была проведена комплексная работа включающая в себя: определение механизма зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке среднеуглеродистой серосодержащей стали, раскисленной алюминием; разработана технология, обеспечивающая снижение зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке среднеуглеродистой серосодержащей стали, раскисленной алюминием; разработан оптимальный состав ассимилирующей шлакообразующей смеси для сталеразливочного ковша, обеспечивающий снижение зарастания погружных стаканов и содержания неметаллических включений при непрерывной разливке среднеуглеродистой серосодержащей стали, раскисленной алюминием.

Опираясь на результаты проведенной работы была определена оптимальная масса шлаковой добавки в сталеразливочный ковш после вакуумирования. Разработана и внедрена технология производства стали с повышенным содержанием алюминия и серы с добавкой в сталеразливочный ковш после вакуумирования металла оптимального количества разработанной шлаковой смеси.

Разработанные мероприятия рекомендованы к применению для снижения аварийных ситуаций в процессе разливки в условиях электросталеплавильного цеха АО «Волжский трубный завод».

Директор по качеству АО «ВТЗ»



Жуков А.С

Приложение 4

Расчёт экономического эффекта от использования патента «Способ внепечной обработки стали» регистрационный номер изобретения № 2607877.

В период май 2015 -май 2016г при производстве НЛЗ сечением 360х360мм из серосодержащих марок стали использована технология описанная в патенте : «Способ внепечной обработки стали» регистрационный номер изобретения № 2607877 .
Обобщённые данные для расчёта экономического эффекта применения патента № 2607877 представлены в таблице №1

Экономическая эффективность применения изобретения

Таблица №1

наименование	факт январь-апрель 2015г (до использования патента)		факт май 2015-май 2016г (после реализации проекта)		отклонение	
	кол-во, кг/тн	руб./тн	кол-во, кг/тн	руб./тн	кол-во, кг/тн	руб./тн
Проволока порошковая с наполнит сера*	0,37	17,01	0,1	0,46	-0,36	-16,55
Обрезь дефектов**	6,33	70,90	11,07	123,98	4,74	53,09
Брак**	43,05	473,55	15,29	168,19	-27,76	-305,36
П4-СКЗ (ШОС для стальнойша для наведения низкоосновного шлака)*	0,0	0,0	2,67	41,04	2,67	41,04
Изменение себестоимости						-227,78

Расчет произведен в ценах на материалы за 2016г.

Из данных таблицы №1 следует, что за период использования патента «Способ внепечной обработки стали» регистрационный номер изобретения № 2607877 май 2015 –май 2016г, фактическая экономия на производство на 1т серосодержащей квадратной НЛЗ составляет- 227,78руб/тн.

При фактическом производстве НЛЗ за период май 2015 –май 2016г - **81876,95т** , экономия составляет **81876,95т** x 227,78руб/тн=**18 649**тыс.руб

Директор по качеству



Жуков А.С.