

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии
им. И.П.Бардина



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**

Специальность 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких
металлов

Автореферат диссертации
на соискание учёной 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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время преобладающим процессом разливки стали является непрерывная разливка, обеспечивающая получение качественной продукции широкого марочного и размерного сортамента. Однако нельзя утверждать, что к настоящему времени все технологические вопросы, связанные с непрерывной разливкой, решены и у металлургов отсутствуют проблемы. Так, значительную долю производства электросталеплавильного цеха АО «Волжский трубный завод» составляет товарная квадратная заготовка сечением 360х360 мм стали С45Е. Сталь С45Е характеризуется нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы (таблица 1), и при ее разливке основной проблемой является зарастание внутренней полости огнеупорного погружного стакана, что приводит к прекращению серии разливки на МНЛЗ, возврату плавки, снижению производительности оборудования и себестоимости продукции. Кроме того, прокат из таких плавок проходит ультразвуковой контроль у заказчика, металл сильно загрязнён неметаллическими включениями, в том числе крупными экзогенного типа.

Таблица 1. – Химический состав стали С45Е

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
Min, %	0,46	0,20	0,70	0,00	0,020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,015
Max, %	0,49	0,35	0,80	0,02	0,035	0,25	0,20	0,25	0,06	0,00	0,050

Для решения данной технической проблемы было необходимо определить механизм зарастания, определить состав неметаллических включений, найти направления борьбы с отклонениями, что является научной работой. Таким образом, улучшение технологии производства стали с нормируемым нижним пределом содержания алюминия и серы является актуальным.

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.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить основные задачи:

- Определить основные направления, по которым 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 с ассимилирующей способностью для сталеразливочного ковша, обеспечивающий всплытие неметаллических включений при непрерывной разливке и увеличение 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».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

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. Предложена методика разработки химического и компонентного состава шлакообразующих смесей для сталеразливочного ковша при непрерывной разливке, в основе которой 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 мин. 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.

Научные положения, выносимые на защиту:

Термодинамическая оценка возможности образования оксидной и сульфидной фаз при обработке металла кальцием, показавшая, что с ростом исходного содержания серы и снижении содержания кислорода (рост содержания алюминия) соотношение сульфидов и оксидов кальция меняется в сторону увеличения количества образующихся сульфидов, что определило целесообразность минимально допустимого содержания серы и максимально допустимого количества кислорода в металле перед его обработкой кальцием.

Результаты петрографических исследований отложений на внутренней полости погружного стакана после разливки через него стали С45Е, при проведении которых установлено, что в отложениях на внутренней поверхности погружного стакана находятся сульфиды кальция, которые и являются основной причиной ухудшения разливаемости стали С45Е.

Результаты изучения свойств покровного шлака промежуточного ковша в процессе серийной разливки стали, которые показали, что ухудшение рафинирующей способности покровного шлака связано с изменением его химического состава в неблагоприятную область, что приводит к повышению его температуры плавления.

Результаты физического моделирования потоков металла в промежуточном ковше.

Практическая значимость

Разработан состав шлакообразующей смеси с повышенной ассимилирующей способностью к глинозёмистым и сульфидным включениям.

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.

Разработана новая конструкция промежуточного ковша увеличенной емкости и нового металлоприемного устройства, обеспечивающие лучшую ассимиляцию включений покровным шлаком.

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

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается применением действующих методик, прошедших аттестацию. Все исследования выполнены в аккредитованных лабораториях.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на следующих конференциях: VI Конференция молодых специалистов в ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет

им. И.П. Бардина» «Перспективы развития металлургических технологий» 25-26 февраля 2015 г., Москва; Международная конференция «Мировые тенденции развития технологии непрерывной разливки стали» 15 декабря 2017 г. Москва.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованных источников. Работа содержит 136 страниц текста, 69 рисунков, 19 таблиц, 91 наименование библиографии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цели и задачи диссертационной работы, показаны ее научная новизна и практическая значимость.

В главе I представлен литературный обзор.

Анализ литературных источников по данной теме показал, что основной причиной зарастания огнеупорного погружного стакана при разливке стали с высоким содержанием алюминия и серы является образование на его внутренней поверхности глинозёмсодержащих фаз и оксисульфида кальция, причём высокое содержание серы способствует этому явлению. Основной метод борьбы с этим явлением – является обработка металла кальцием. Однако этого недостаточно, необходимо удалять образующиеся неметаллические включения. Для этого в каждом конкретном случае следует определить направления изменения технологии с целью достижения максимально возможного рафинирования металла от неметаллической фазы.

В главе II описана методика проведения исследований и научные приборы, использованные автором в данной работе.

Определение состава фаз и анализ микроструктуры производились на оборудовании MLA System Quanta 650 фирмы FEI Company, с возможностью количественного и качественного определения состава неметаллических включений в стали.

Рентгенофазовый анализ проводили на оборудовании фирмы PANalytical, дифрактометр X'PERT PRO модульной конструкции для научных исследований и аналитического контроля в промышленности.

Во время проведения промышленного эксперимента отбор ковшовых проб металла и проб металла от непрерывнолитой заготовки и проката осуществляли по ГОСТ 7565-81.

Химический состав стали анализировали с помощью нескольких типов спектрометров.

Применяли:

а. Рентгенофлуоресцентный спектрометр S8 EXPLORER. Мощность рентгеновской трубки 4 кВт.

б. Оптический эмиссионный спектрометр SPECTROLAB с искровым источником возбуждения спектра.

Для проведения химического анализа сталеплавильных шлаков, шлаков промежуточного ковша МНЛЗ и наростов сталеразливочного стакана использовали спектрометр рентгеновский кристалл-дифракционный вакуумный «Спектроскан Макс GV».

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

Типы термопар по ГОСТ Р8.58–52001

Температурный интервал плавления шлаков определяли высокотемпературным микроскопом ЕМ 201 (производитель – Hesse, Германия).

Вязкость шлакообразующих смесей предварительно прокаленных образцов определяли ротационным вискозиметром VIS 403 (производитель – Bähr, Германия).

В главе III рассмотрены результаты изучения действующей технологии производства стали с нормируемым нижним пределом содержания серы и алюминия на АО «Волжский трубный завод».

Плавка стали типа С45Е осуществляется в 150-т дуговой печи с газокислородными горелками. Шихтовка – три корзины стального лома с подачей свежееобожжённой извести через свод. При достижении температуры ванны 1530...1560°C начинают интенсивную продувку металла кислородом (окислительный период). После достижения температуры металла 1570...1600°C скачивается окислительный шлак. Металл через эркерное выпускное отверстие выпускают 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 (C=0,45 % Mn=0,65 % Cr=0,1 % Ti=0,008 %), известь 800...1000 кг, алюмокорундовая смесь ММКН-75 (Al₂O₃ не менее 75 %, SiO₂ не более 6,0% Cr₂O₃ не более 4,0 % TiO₂ 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 поддерживают 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 проводят слив излишнего шлака в шлаковую чашу до достижения толщины слоя шлака менее 50 мм, присаживают серосодержащую проволоку из расчёта превышения содержания серы на 0,003 % выше нижнего предела марки.

Перед вакуумной обработкой в ковш присаживают 30...35 кг гранулированного алюминия. Проводят вакуумную обработку до достижения тре-

буемой для отдачи на МНЛЗ температуры металла. После окончания вакуумирования присаживают алюминиевую катанку, проводят усреднительную продувку аргоном в течение 3...5 мин. Вводят кальцийсодержащую проволоку и в течение 5...10 мин. проводят усреднительную продувку. 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 более 0,005% (по стандарту нижний предел содержания в марке (0,020...0,025 %)), содержание углерода 0,44...0,46 %. На шлак подают теплоизолирующую смесь – рисовая лузга. Время до начала разливки не должно превышать 20 мин.

Металл разливают на УНРС через промежуточный ковш, футерованный торкрет массой на основе MgO, вместимостью 22тн. На поверхность металла в промежуточном ковше подают теплоизолирующую шлакообразующую смесь марки П4.

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 зарастании не привело к положительному эффекту.

В работе проведена термодинамическая оценка образования сульфидов при обработке металла кальцием. Равновесные концентрации кальция, серы и кислорода описываются системой балансовых и равновесных уравнений:

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

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

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

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

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

На основании вышеприведенных закономерностей было рассчитано количество кальция, участвующего в образовании оксидов и сульфидов для различных исходных концентраций кислорода (алюминия) и серы. Результаты представлены на рисунках 1 – 4.

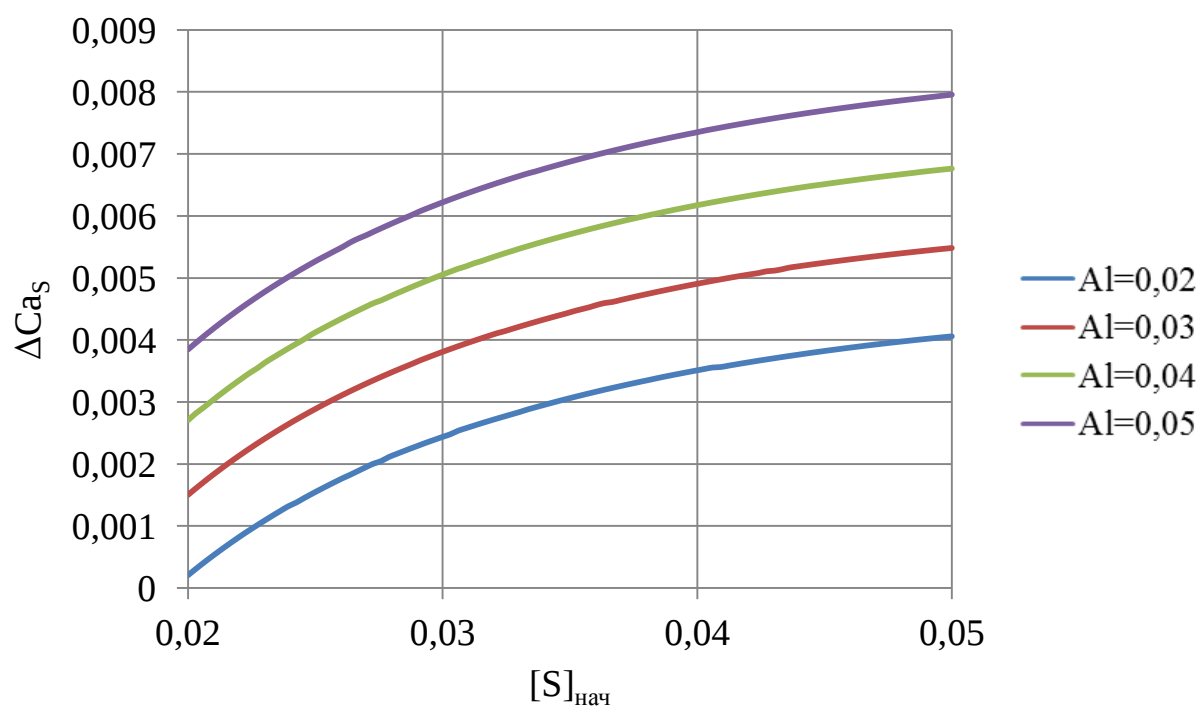


Рис. 1. Влияние начального содержания серы на количество кальция %, связываемого в сульфид при различном начальном содержании алюминия

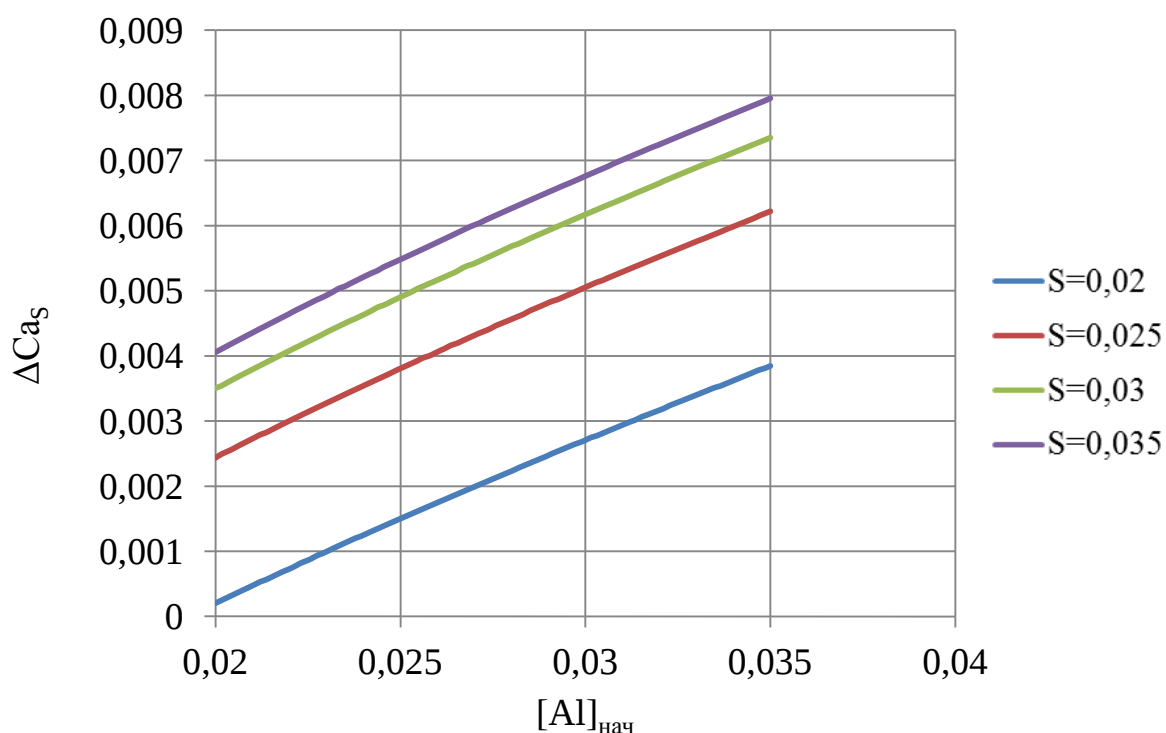


Рис. 2. Влияние начального содержания алюминия на количество кальция %, связываемого в сульфид при различном начальном содержании серы

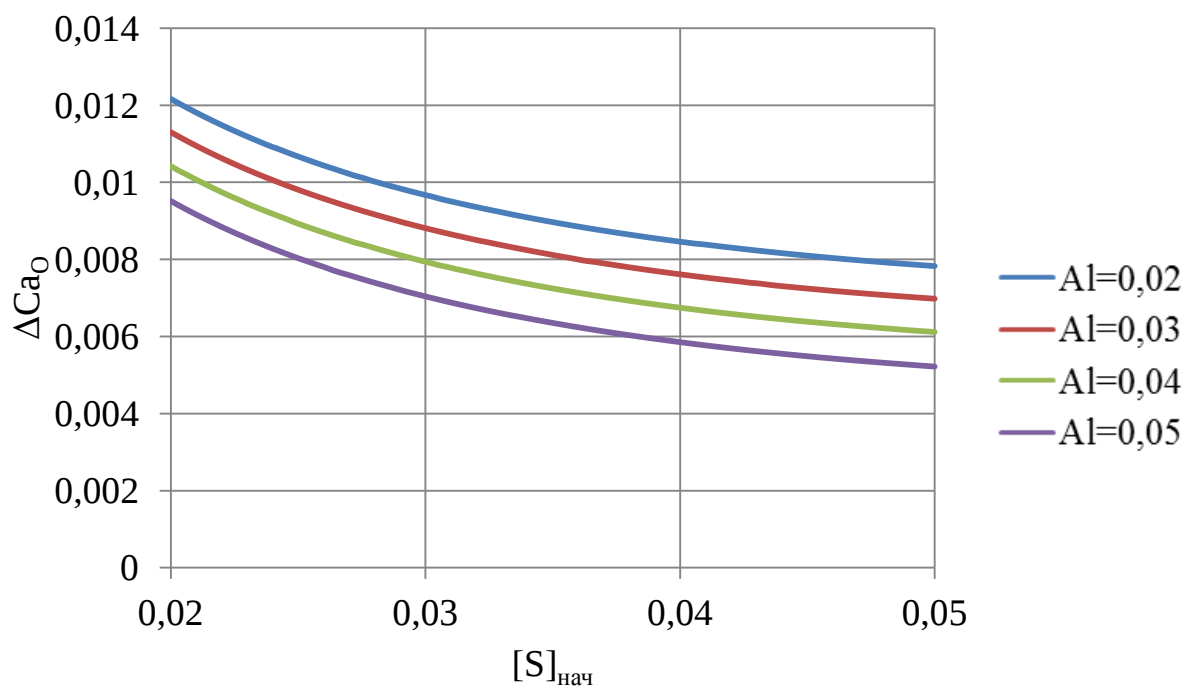


Рис. 3. Влияние начального содержания серы на количество кальция %, связываемого в оксид при различном начальном содержании алюминия

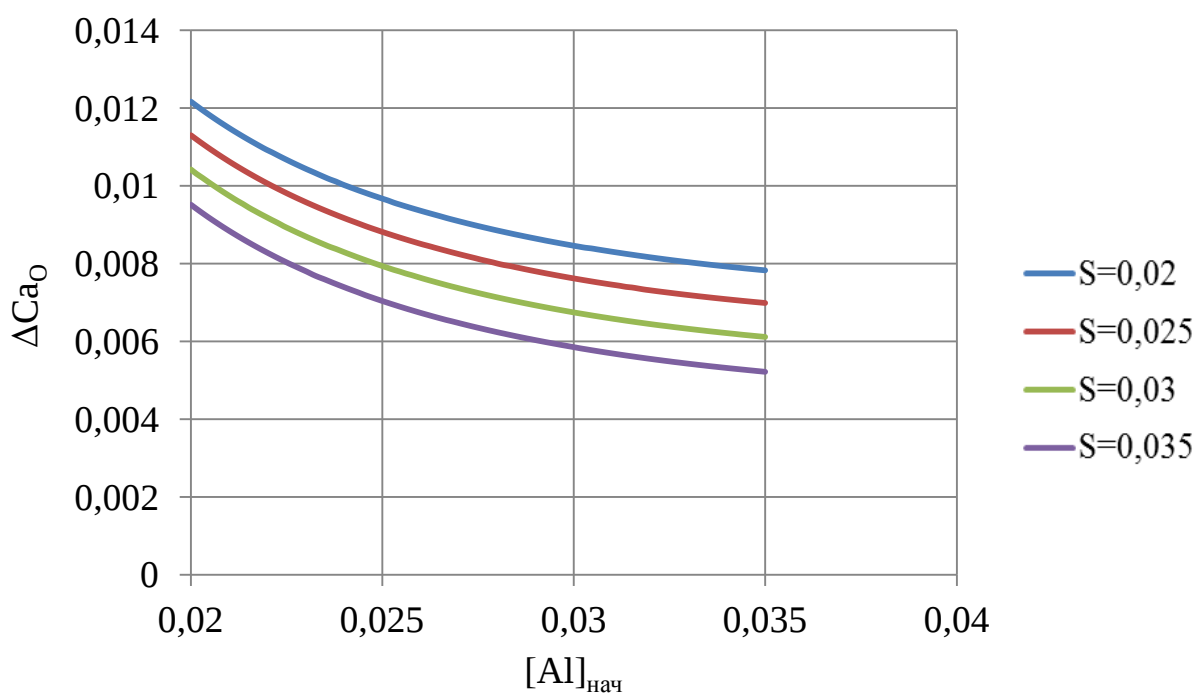


Рис. 4. Влияние начального содержания алюминия на количество кальция %, связываемого в оксид, при различном начальном содержании серы

Проведенная термодинамическая оценка показала, что во всем диапазоне концентрации серы и алюминия, по требованиям технологической инструкции, после того как в расплав ввели серу, имеется возможность образо-

вания как оксидов кальция, так и сульфидов кальция. При этом с ростом исходного содержания серы и снижении содержания кислорода (рост содержания алюминия) это соотношение меняется в сторону увеличения количества образующихся сульфидов.

Таким образом, 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.

Для подтверждения данных расчётов были проведены металлографические исследования отложений на внутренней полости погружного стакана после разливки через него стали С45Е (рисунок 5).

В результате исследований установлено, внутри металлопроводки находятся сульфиды кальция, которые и являются основной причиной ухудшения разливаемости стали С45Е.

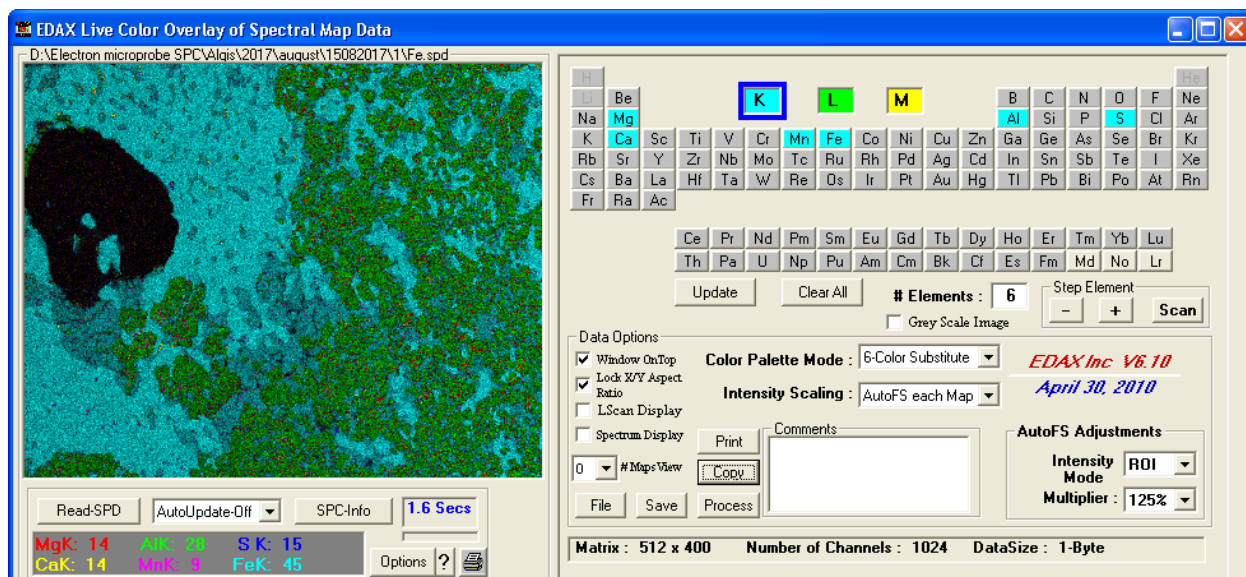


Рис. 5. Анализ отложений на внутренней поверхности погружного стакана после разливки стали С45Е

Поскольку образование сульфидов кальция происходит на заключительном этапе доводки металла при внепечной обработке, то снизить их содержание в процессе непрерывной разливки можно только за счет 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. В связи, с чем был проанализирован шлаковый режим в процессе непрерывной разливки и определены причины ухудшения свойств покровного шлака.

Проанализирован химический состав шлака в промежуточном ковше в течение всей серии плавов. Обнаружено, что химический состав шлака в течение серии плавов подвергается изменению, так как в ковш по окончании

каждой плавки попадает шлак из сталь – ковша, где повышается оксид алюминия и магния, а фтор и оксид кремния уменьшается. Это повышает вязкость и основность шлака, что приводит к снижению его ассимилирующей способности (рисунок 6).

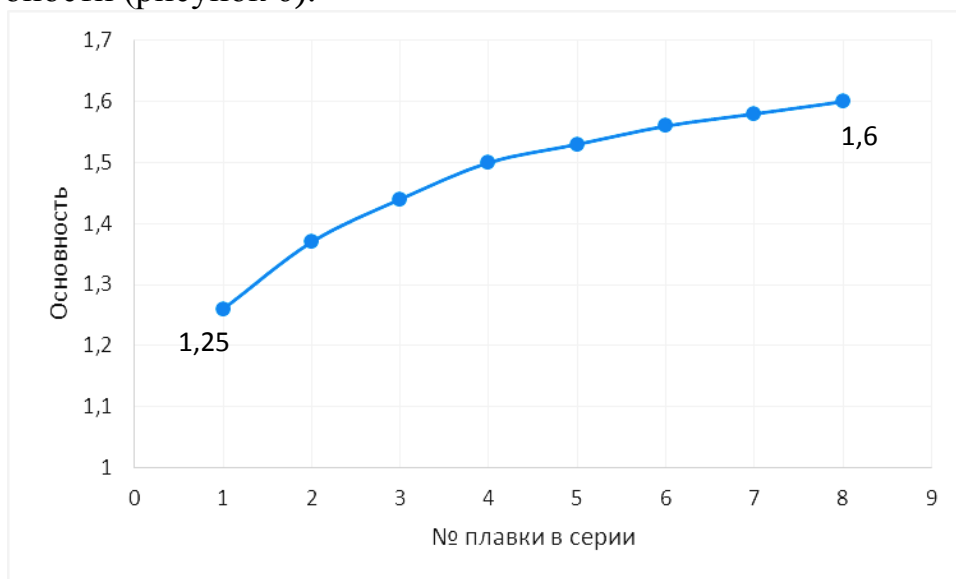


Рис. 5. Изменение основности шлака промежуточного ковша в зависимости от порядкового номера плавки в серии

На диаграмме состояния $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (рисунок 6) показано изменение химического состава шлака в процессе серийной разливки и область приемлемого изменения базового состава шлака в оптимальном уровне.

Как следует из представленных данных, у шлакового расплава в каждой последующей плавке внутри одной серии будет увеличиваться температура растекания, что снижает жидкий слой шлака и переход неметаллических включений в него. Результатом такого процесса является рост количества включений, попадающих в погружной стакан, и его зарастание в процессе разливки.

В главе IV описывается разработка составов шлакообразующих смесей (ШОС) для сталеразливочного ковша и их промышленное опробование.

Проведенным анализом существующей технологии показано, что химический состав шлака в течение серии плавков подвергается изменению из-за попадания сталеразливочного шлака в промежуточный ковш. Из чего следует, что оптимальным решением для влияния на химический состав шлака в промежуточном ковше является формирование в сталеразливочном ковше такого шлака, который при попадании в промежуточный ковш менял бы состав его шлака на более благоприятный.

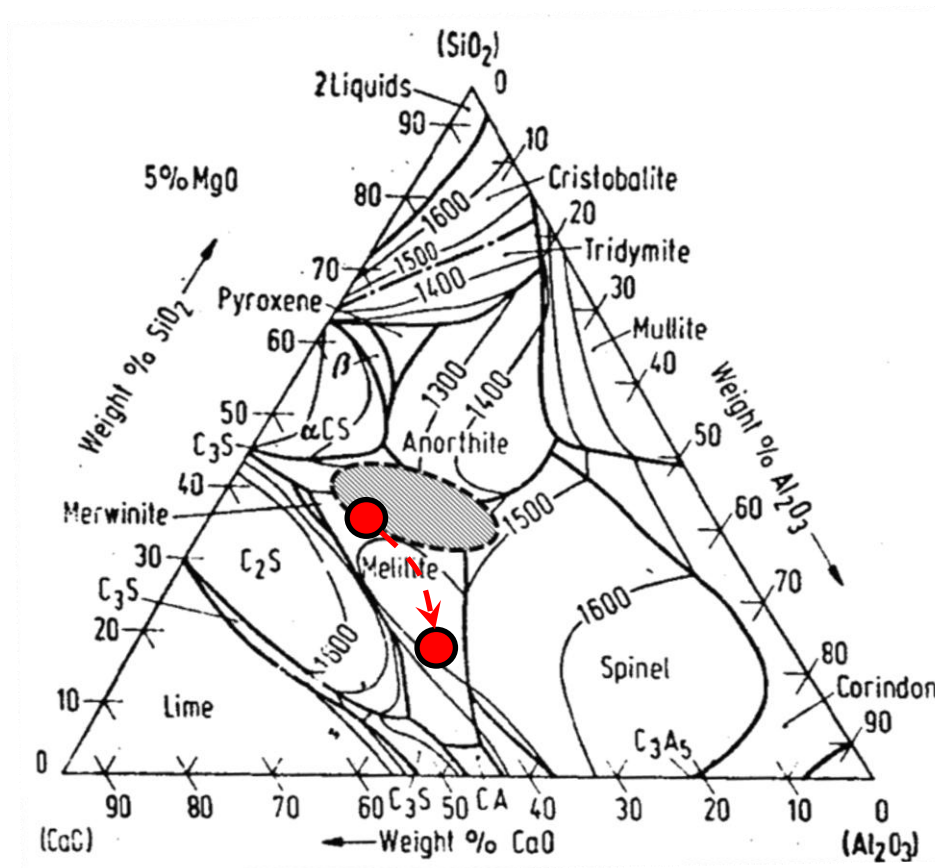


Рис. 6. Изменение химического состава шлака в процессе серийной разливки и область приемлемого изменения базового состава шлака в оптимальном уровне.

Как видно по диаграмме достижение заданной цели возможно при сохранении основности (CaO/SiO_2) 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 CaO/SiO_2 0,8...1,2.
2. Шлак сталеразливочного ковша должен иметь как можно более низкое содержание оксида алюминия не более 15,00%. Исходя из этих требований, были разработаны различные варианты химического состава шлаковых смесей, присаживаемых в сталеразливочный ковш.

Для оптимизации конечного количества шлака в сталеразливочном ковше перед подачей шлаковой смеси необходимо удалить излишнее количество первичного высокоосновного шлака. Для этого в предлагаемой технологии предусмотрен слив шлака, остаток не более 25 мм, что соответствует массе шлака 150...250 кг. При разработке покровных шлаков сталеразливочного ковша следует учитывать, что важнейшая функция этих шлаков – теплоизоляция стального расплава. 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.

Проведены расчёты для шлаков различного состава (таблица 2) и получены расчётные значения температуры поверхности шлака в сталеразливочном ковше для шлаков различного состава.

Таблица 2. – Расчетное количество присадки различных вариантов разрабатываемой ШОС для сталеразливочного ковша

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
Масса присадки, кг	460	330	250	210	180

Для поддержания определенной температуры поверхности шлака расходуется различное количество тепла при использовании различных шлаков. С точки зрения минимизации тепловых потерь наилучшим шлаком 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 отличаются принципиально большими теплоизоляционными свойствами по сравнению со шлаками №№ 3 – 4.

Таким образом при выборе вариантов технологических присадок необходимо исходить из экономической целесообразности применения ШОС того или иного состава. 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 – 5.

ШОС после их подачи в сталеразливочный ковш в количестве, указанном в таблице 2, в результате смешивания с остатками высокоосновного шлака будут образовывать шлаковый расплав с достаточно низкой температурой плавления. Для достаточно быстрого расплавления ШОС в сталеразливочном ковше, 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.

Разработан оптимальный химический и компонентный состав шлакообразующей смеси, названной П-4ск (таблица 3).

Таблица 3. Химический и компонентный состав шлакообразующей смеси для сталеразливочного ковша

Химический состав, масс. %						
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Fe ₂ O ₃	C
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
Содержание компонентов, мас. %						
Портланд-цемент ПЦ 500	Сиенит	Формовочный песок	Графит синтетический.	Отходы огнеупоров (MgO+SiO ₂)	Оксид магния	
34,0	15,0	36,0	5,0	10,0	0,0	

Проведены промышленные испытания в электросталеплавильном цехе АО «Волжский трубный завод». На рисунке 7 на четырехкомпонентной диаграмме CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO указаны области, соответствующие среднему базовому составу шлака в сталеразливочном ковше при производстве стали С45Е после вакуумной обработки с применением различных ШОС.

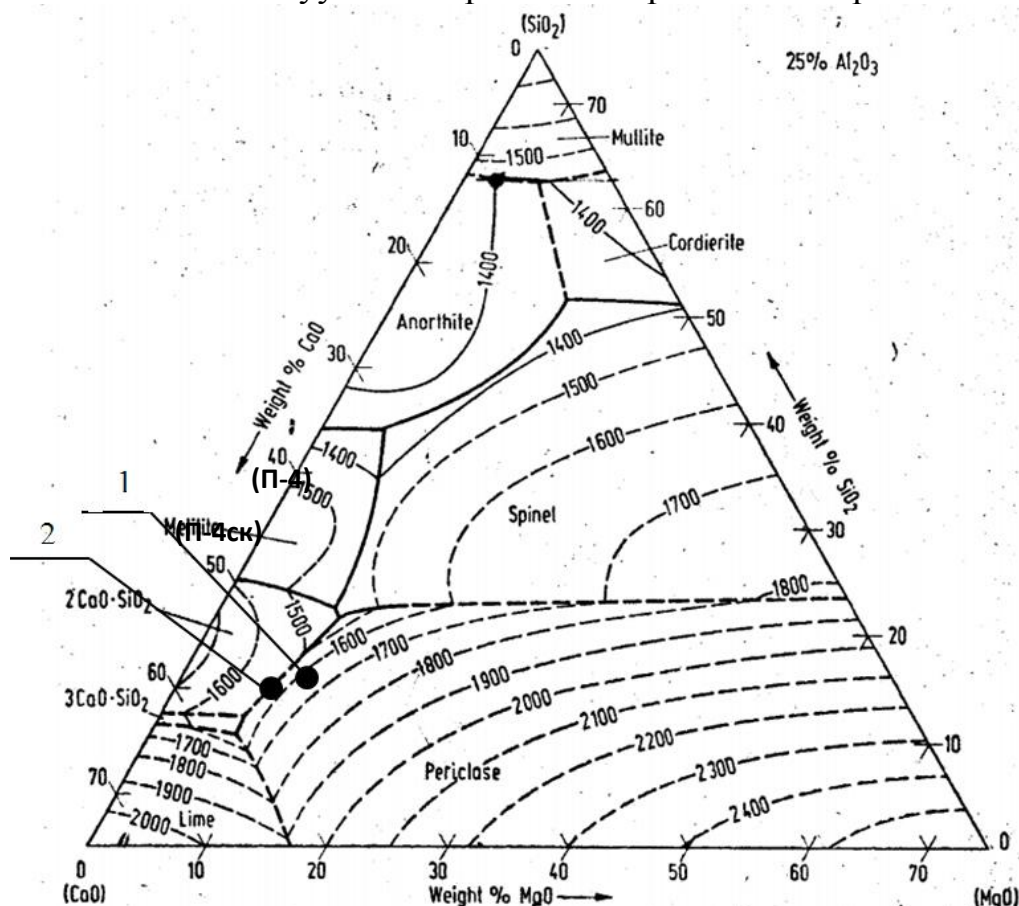


Рисунок 7. – Базовые составы шлака в сталеразливочном ковше после вакуумной обработки стали в ковшевом вакууматоре при производстве стали марки С45Е. С применением ШОС: 1 – П-4; 2 – П-4ск

Из диаграммы, представленной на рисунке 7 следует, что после добавления опытной ШОС П-4ск температура ликвидус шлака в сталеразливочном ковше ориентировочно на 100 °С ниже, чем при использовании ШОС П-4. Т.е. 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 основании расчётов рекомендованы следующие параметры шлакового режима: 150 кг шлака в промежуточном ковше, 200 кг смеси П-4ск в сталеразливочный ковш, и удаление шлака до остатка – не более 500 кг.

В главе V описано физическое моделирование потоков жидкого металла в промежуточном ковше.

В ЭСПЦ АО «ВТЗ» на четырёх ручьевой МНЛЗ использовался Т-образный стопорный промежуточный ковш без использования 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.

Из оргстекла была изготовлена модель Т-образного промежуточного ковша в масштабе 1:10. В металлоприемном устройстве были проделаны отверстия для оптимизации распределения потоков металла в разливочной ёмкости промежуточного ковша (рисунок 8).



Рис. 8. Модель Т-образного промежуточного ковша в масштабе 1:10

Металлоприемное устройство устанавливали в приёмную ёмкость промежуточного ковша и промежуточный ковш снабжали дополнительными порогами. Скорость потоков определяли методом трассировки, добавляя в воду в начальный момент несколько кристаллов перманганата калия.

На основании моделирования разработана огнеупорная футеровка промежуточного ковша. Конструкция футеровки позволила увеличить ёмкость промежуточного ковша и уровень металла при стационарных и переходных режимах разливки с 700 до 900 мм, что позволило избежать затягивания шлака промежуточного ковша в образующуюся при снижении уровня металла во время смены сталеразливочного ковша вихревую воронку. Были изготовлены металлоприемные устройства, перегородки со щелевым отверстием и пороги.

В главе VI описана разработанная и внедрённая автором промышленная технология.

Технология от исходной отличается тем, что при выпуске в сталь - 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. Внепечную обработку проводят на двух установках ковш-печь последовательно с непрерывным перемешиванием металла аргоном. После отдачи основного количества ферросплавов и 200...400 кг извести проводят десульфурацию, содержание серы перед подачей ковша на вакуумную установку 0,002-0,005%. Содержание алюминия перед подачей ковша на вакуумную установку – в пределах 0,030...0,035 %.

После обработки металла на агрегатах ковш-печь № 1 и ковш-печь № 2 производят слив излишков шлака в шлаковую чашу до достижения толщины слоя шлака в сталеразливочном ковше не более 50 мм. После постановки сталеразливочного ковша в камеру вакууматора производят отдачу ассимилирующей ШОС П4ск в количестве 180...220 кг. 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, производят присадку порошковой алюминиевой катанки. После присадки алюминиевой катанки в течение 2...3 мин. производят усреднительную продувку металла аргоном (содержание алюминия перед разливкой составляет 0,020...0,026%). Далее производят обработку 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. производят усреднительную продувку 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 перемешивают аргоном. Производят отбор проб на химический анализ и содержание азота в металле, а также пробы шлака,

после чего дальнейшую продувку металла аргонem прекращают. Перед отправкой металла на разливку производят присадку рисовой лузги в количестве 170...180 кг.

Непрерывную разливку осуществляют через промежуточный ковш вместимостью 27 тн., с изменённой конструкцией турбостопа.

Внедрение разработанной технологии позволило в 5,86 раза снизить средний показатель по количеству замен стаканов, приходящихся на одну плавку, повысить серийность разливки и снизить количество возвратных плавов из-за зарастания погружных стаканов.

Глава VII посвящена расчёту экономической эффективности разработанной технологии.

При годовом производстве высокосернистой стали, раскисленной алюминием 300 000 т/год экономический эффект от внедрения новой технологии внепечной обработки и разливки стали С45Е с использованием ШОС П-4ск составит 31 860 000 рублей. Эффект получен в результате снижения числа переводов стали в другую марку, снижения возврата плавов из-за зарастания огнеупорных стаканов, повышения серийности разливки и снижения расхода погружных стаканов.

ВЫВОДЫ

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. Предложена методика 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 плавов. 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 предложенной методики 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 ($\text{MgO} + \text{SiO}_2$) 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 чистоту металла по неметаллическим включениям и уменьшить 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.

Основные публикации по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. А.Н. Божесков, В.В. Казаков, А.А. Коростелев и др. Применение стаканов-дозаторов с продувкой аргоном для повышения уровня разливаемости сталей // Сталь, 7 (2015) 3-15. (WoS, ВАК)
2. А.А. Коростелев, Н.С. Съёмщиков, А.А. Чернышев, А.Н. Божесков и др. Опыт применения стопоров-моноблоков с магниевой головной частью // Новые Огнеупоры, 6 (2016) 3-7. (WoS, ВАК)

3. А.А. Коростелев, Н.С. Съёмщиков, А.А. Чернышев, А.Н. Божесков и др. Преимущества эксплуатации стопоров-моноблоков с магнезиальной головной частью // *Сталь*, 5 (2016) 16-17. (WoS, BAK)
4. А.Н. Божесков, А.В. Куклев, И.В. Лебедев и др. Разработка шлакообразующей смеси для сталеразливочного ковша и технологии ее применения при производстве сталей с повышенным содержанием алюминия и серы // *Металлург*, 11 (2015) 79-82. A.N. Bozheskov, A.V. Kuklev, I.V. Lebedev et al. Development of slag-forming mixture for steel-pouring ladle and its application technology during production of steels with high aluminum and sulfur content // *Metallurgist*, 59(11-12) (2016). 1081-1085.(WoS, Scopus, BAK)
5. А.Н. Божесков, А.В. Аленин, В.В. Казаков и др. Физическое моделирование потоков металла в промежуточном ковше УНРС-2 ЭСПЦ АО «Волжский трубный завод» с целью совершенствования его конструкции // *Металлург*, 12 (2018) 39-41. (WoS, BAK)
6. Анисимов К.Н., Гусев М.П., Куклев А.В., Лонгинов А.М., Топтыгин А.М., Божесков А.Н. Выбор расчетной модели вязкости шлакообразующих смесей // *Теория и технология металлургического производства*, 4 (2018) 25-29. (WoS)
7. Божесков А.Н., Топтыгин А.М., Лонгинов А.М., Тиняков В.В. Разработка технологии производства высокосернистой стали с высоким содержанием алюминия в электросталеплавильном цехе Волжского трубного завода // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2 (2018) 24-29. (WoS, BAK)
8. Божесков А.Н., Топтыгин А.М., Лонгинов А.М., Тиняков В.В. Разработка технологии производства высокосернистой стали с высоким содержанием алюминия в электросталеплавильном цехе Волжского трубного завода // *Металлург*, 2 (2019) 32-36. (WoS, BAK)
9. А.А. Korostelev, N.S. S'emshchikov, A.A. Chernyshev ... A.N. Bozheskov et al. Experience of Using Monoblock Stoppers with a Magnesia Head Section // *Refractories and Industrial Ceramics*, 57(3) (2016) 224-228. (Scopus)
10. Шлакообразующая смесь для защиты металла в промежуточном и сталеразливочном ковшах: пат. 2600605 Рос. Федерация: В22D 11/11 (2006.01)/ Куклев А.В., Топтыгин А.М., Лебедев И.В., Божесков А.Н.,

Анисимов К.Н.; заявитель и патентообладатель ООО «КОРАД». - № 201512107202; заявл. 03.06.2015; опубл. 27.10.2016. (ВАК)

11. Способ внепечной обработки стали : пат. 2607877 Рос. Федерация, С21С 7/06 (2006.01); С21С 7/076 (2006.01); С21С 7/10 (2006.01)/ Трутнев Н.В., Божесков А.Н., Неклюдов И.В., Морозов В.В., Анисимов Е.Б.; заявитель и патентообладатель АО «Волжский трубный завод» - № 2015122359; заявл. 10.06.2015; опубл. 20.01.2017, Бюл. №2. (ВАК)