

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



**Запольская Екатерина Михайловна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗОГРЕВА И  
ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ  
АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ФУТЕРОВОК  
СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

Специальность 2.6.2 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
д.т.н., профессор  
Темлянцев М.В.

Новокузнецк – 2023

## Содержание

	Стр.
Введение.....	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Металлургические аспекты применения углеродсодержащих огнеупоров в футеровках сталеразливочных ковшей.....	12
1.2 Влияние углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей на загрязненность стали неметаллическими включениями.....	25
1.3 Теплотехнологии и конструкции стендов для разогрева углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей.....	27
1.4 Математическое моделирование тепловой работы стендов высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей.....	35
1.5 Выводы и постановка задач исследования.....	38
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	41
2.1 Обоснование выбора огнеупорных материалов для исследования процессов высокотемпературного обезуглероживания.....	41
2.2 Применяемое оборудование и методика проведения экспериментальных исследований.....	42
3 ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ КОВШЕВЫХ ОГНЕУПОРОВ.....	46
3.1 Исследование кинетики высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров марки APC-75Н1.....	46
3.2 Исследование минералогического и фазового составов обезуглероженных слоев ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75Н1.....	51
3.3 Исследование водопоглощения и анализ изменения макроструктуры ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75Н1 при термической обработке.....	56
3.4 Термогравиметрический анализ процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров.....	58
Выводы по главе 3.....	67
4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ГАЗОВЫХ СТЕНДОВ ПРИ РАЗОГРЕВЕ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ.....	69
4.1 Совершенствование комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стендов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей.....	69
4.2 Разработка нового критерия тепловой эффективности стендов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей.....	83

4.3 Исследование влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева.....	84
4.4 Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей.....	91
4.5 Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей.....	97
4.6 Исследование эффективности совместного использования теплоизолированных крышек, подогрева и обогащения кислородом окислителя при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей.....	104
Выводы по главе 4.....	108
<b>5 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ФУТЕРОВОК 350-Т СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ И КАЧЕСТВА СТАЛИ В УСЛОВИЯХ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА №2 АО «ЕВРАЗ ОБЪЕДИНЕННЫЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ».....</b>	<b>110</b>
5.1 Анализ влияния показателей ритмичности производства на стойкость алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т сталеразливочных ковшей.....	110
5.2 Разработка малообезуглероживающих температурных режимов разогрева футеровок на стендах.....	112
5.3 Применение защитных покрытий для предотвращения обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров.....	119
Выводы по главе 5.....	120
Заключение и основные выводы по диссертации.....	122
Список литературы.....	125
Приложение А.....	140
Приложение Б.....	141

## **Введение**

### **Актуальность темы исследования**

По данным международной ассоциации стали (World Steel Association, WSA) мировое производство стали в 2021 г. составило 1,95 млрд. т. Мощностями по ее производству располагают более 60 стран мира, при этом ежегодно наблюдается тенденция их увеличения. Производство стали характеризуется высокой ресурсо- и энергоемкостью, при этом одним из наиболее важных ресурсов, используемых в сталеплавильном производстве, являются огнеупорные материалы. Характерно, что затраты на огнеупоры, применяемые в футеровке сталеразливочных ковшей, по оценке различных сталеплавильных компаний и предприятий производящих огнеупоры, составляют от 30 до 60 % от затрат всего сталеплавильного комплекса на огнеупоры основного состава.

Фактически вся сталь, выплавляемая в кислородных конвертерах и электродуговых сталеплавильных печах, выпускается в сталеразливочные ковши, относящиеся к основному виду металлургического оборудования. Ранее сталеразливочные ковши применялись в качестве технологических емкостей, используемых для транспортировки и разлива расплава металла. В настоящее время, в условиях ужесточения требований к качеству и расширению марочного сортамента стали, металлургические ковши трансформировались в реакторы для внепечной обработки стали, микролегирования и рафинирования расплава. Увеличение температур, продолжительности и степени агрессивности воздействия расплава металла и шлака привело к применению в футеровке рабочего слоя сталеразливочных ковшей высокостойких безобжиговых углеродсодержащих (периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых) смолосвязанных огнеупоров. Одним из основных недостатков таких огнеупоров является окисление углерода, входящего в их состав, при контакте с окислительными газами на стадиях разогрева футеровки и при транспортировании и внепечной обработке расплава. Выгорание в поверхностных слоях графита и углеродного каркаса огнеупора приводит к повышению пористости последнего, смачиванию расплавом и интенсивному износу футеров-

ки. Наиболее интенсивно окислительные процессы протекают при первом разогреве новой футеровки, при этом глубина обезуглероженного слоя огнеупора может достигать 8 – 10 мм. Несовершенство существующих технологий разогрева футеровок сталеразливочных ковшей приводит к снижению их стойкости (еще до ввода в эксплуатацию) фактически на 5 – 10 %, повышает риск загрязнения расплава стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения, снижению качества и повышению себестоимости производимой стали. В связи с этим разработка малообезуглероживающих ресурсосберегающих технологий разогрева углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей является актуальной научно-практической задачей, имеющей отраслевое значение.

### **Степень разработанности темы**

Снижение загрязненности расплава стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения, создание новых коррозионно- и эрозионностойких огнеупоров для сталеразливочных ковшей и разработка ресурсосберегающих теплотехнологий предплавочного разогрева футеровок является предметом активных исследований отечественных и зарубежных ученых. Формированию, трансформации неметаллических включений футеровочного происхождения и повышению качества стали посвящены исследования коллективов ученых, выполненные под руководством В.И. Явойского, М.И. Виноград, В.Г. Воскобойникова, В.А. Кудрина, К.В. Григоровича, А.И. Зайцева, А.А. Казакова, В.С. Дуба и др. Рациональные конструкции футеровок сталеразливочных ковшей, теоретические основы повышения стойкости и практика применения огнеупоров для службы в контакте с расплавами стали и шлаков рассмотрены в работах Г.Г. Аристова, А.К. Карклита, И.Д. Кашеева, К.К. Стрелова, П.С. Мамыкина, Л.Б. Хорошавина, Ю.Е. Пивинского, Л.М. Аксельрода, С. Окке, В.С. Старикова и др. Совершенствованию существующих и разработке новых прогрессивных теплотехнологий и конструкции стендов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей посвящены труды В.А. Вихлевщюка, Ф.Р. Шкляра, К. Рама, М.В. Краснянского и др. В то же время, малоизученной областью являются кинетика высокотемпературного окис-

ления алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров массового производства, малообезуглероживающие ресурсосберегающие режимы разогрева ковшевых футеровок, рабочий слой которых выполнен из огнеупоров указанного состава и их влияние на металлургическое качество стали.

Диссертация выполнена в рамках задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ НИР № 1622ПГЗ, в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (договор № ДГЗС7-017364 от 01.04.2016 г.).

### **Цель работы**

Повышение стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей на основе разработки и применения малообезуглероживающих ресурсосберегающих режимов разогрева.

### **Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

1) Разработать многофакторную детерминированную математическую модель тепловой работы газового стенда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой (в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение), и тепло-массообменных процессов, протекающих при высокотемпературном разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей.

2) Исследовать кинетику высокотемпературного окисления алюмопериклазоуглеродистых и периклазоуглеродистых огнеупоров марок APC-75H1, AMC 78-8/7HG и RI-MC175LC, MayCarb284-AX. Установить и научно обосновать закономерности влияния состава различных огнеупоров и температурно-временного фактора на интенсивность окислительных процессов.

3) Исследовать свойства, минералогический, фазовый состав и макроструктуру обезуглероженных слоев алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров,

научно обосновать их влияние на качество стали по экзогенным неметаллическим включениям футеровочного происхождения.

4) Исследовать влияние различных факторов на тепловую эффективность стендов, разработать малообезуглероживающие ресурсосберегающие режимы разогрева сталеразливочных ковшей, обеспечивающие повышение стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок и металлургическое качество стали.

5) Апробировать и внедрить результаты теоретических и экспериментальных исследований в производство и учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия», 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

### **Научная новизна**

1) Разработаны основные принципы создания малообезуглероживающих ресурсосберегающих температурных режимов разогрева алюмопериклазоуглеродистых ковшевых футеровок.

2) Впервые установлены кинетические закономерности высокотемпературного обезуглероживания углеродсодержащих ковшевых огнеупоров марок APC-75H1, AMC 78-8/7HG, RI-MC175LC и MayCarb284-AX.

3) Получены новые данные о строении, минералогическом и фазовом составе обезуглероженных слоев алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров.

4) Получен новый критерий тепловой эффективности стендов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Установлены и научно обоснованы зависимости влияния параметров конструкции стенда, футеровки, температурного режима разогрева на тепловую эффективность стенда.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1) Разработана детерминированная математическая модель тепловой работы стендов высокотемпературного разогрева, позволяющая создавать новые

энерго- и ресурсосберегающие технологии разогрева футеровок сталеразливочных ковшей.

2) Получены эмпирические зависимости влияния температурно-временного фактора на процессы обезуглероживания, данные о строении и свойствах обезуглероженных слоев алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров, позволяющие создавать новые и совершенствовать существующие конструкции футеровок сталеразливочных ковшей в целях повышения срока их службы и качества стали по степени загрязненности экзогенными неметаллическими включениями.

3) Малообезуглероживающие ресурсосберегающие температурные режимы разогрева алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т сталеразливочных ковшей приняты к промышленному внедрению в кислородно-конвертерном цехе № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Ожидаемый годовой экономический эффект, основанный на увеличении стойкости футеровки, составляет 12 млн руб.

4) Математическая модель, новые эмпирические данные по кинетике обезуглероживания ковшевых огнеупоров и научные основы создания малообезуглероживающих ресурсосберегающих температурных режимов разогрева алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используется при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия», 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

### **Положения, выносимые на защиту**

1) Результаты экспериментальных исследований кинетики обезуглероживания углеродсодержащих огнеупоров марок APC-75H1, AMC 78-8/7HG, RIMC175LC и MayCarb284-AX. Установленные зависимости и закономерности влияния температурно-временного фактора на интенсивность процессов окисления углерода, содержащегося в огнеупоре.



2) Результаты исследования структуры, строения, фазового, минералогического состава и механизм их влияния на стойкость алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров марки APC-75H1 при контакте с расплавами металла и шлака и загрязненность стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения.

3) Новый критерий тепловой эффективности стендов высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей и результаты разработки с применением математического моделирования малообезуглероживающих ресурсосберегающих температурных режимов разогрева алюмопериклазоуглеродистых ковшевых футеровок.

### **Методология и методы исследования**

Процессы обезуглероживания огнеупоров исследовали с применением гравиметрического метода и термоанализатора LABSYS. Температуру образцов определяли с помощью метода термометрирования. Рентгенофазовый анализ огнеупоров выполняли на рентгеновском дифрактометре XRD-6000. Полуколичественный анализ состава огнеупора проводили на рентгеновском флуоресцентном спектрометре со встроенным дифракционным каналом ARL 9800. Макроструктуру обезуглероженных слоев огнеупоров исследовали методами оптической микроскопии. Для разработки температурных режимов применяли детерминированную математическую модель, позволяющую рассчитывать нестационарные температурные поля в многослойных футеровках с применением метода конечных разностей.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждаются:** применением воспроизводимого по точности математического и физического моделирования с использованием современных достижений теорий теплопроводности; качеством измерений и результатами статистического анализа экспериментальных данных; сопоставлением и сходимостью полученных результатов с данными других исследователей; примени-

ем стандартных методов и методик определения химического и фазового состава огнеупоров.

**Автору принадлежит:** постановка задач теоретических и экспериментальных исследований, критический анализ и систематизация литературных данных, проведение лабораторных экспериментов по исследованию кинетики обезуглероживания огнеупоров, строения и свойств обезуглероженных слоев, разработка алгоритма математической модели, проведение многовариантных расчетов малообезуглероживающих и ресурсосберегающих режимов разогрева, получение нового критерия тепловой эффективности стенов, обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, установление и научное обоснование выявленных зависимостей и закономерностей, формулирование выводов, заключения и положений, выносимых на защиту.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.2 – Металлургия черных, цветных и редких металлов п. 13 «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах», п. 23 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов».

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 17 конференциях различного уровня: Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения великого русского ученого-металлурга Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее», УрФУ, г. Екатеринбург, 2014 г., IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах», СибГИУ, г. Новокузнецк, 2016 г., XIV международном конгрессе сталеплавателей и производителей металла, 2016 г., VI Всероссийской научно-практической конферен-

ции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ 2017) с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», УрФУ, г. Екатеринбург, 2017 г., «Кузбасс: Образование, наука, инновации», Материалы инновационного конвента, 2017 г., Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения)», ИГЭУ, г. Иваново, 2017 г., XVII, XVIII, XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество», СибГИУ, г. Новокузнецк, 2013, 2014, 2021 гг.; Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», СибГИУ, г. Новокузнецк, 2014, 2015, 2019, 2021 гг.

**Публикации:** Результаты диссертации опубликованы в 30 печатных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, в их числе 5 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и приложений. Изложена на 141 страницах, содержит 46 рисунков, 9 таблиц, список использованных источников из 129 наименований.

## **1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1.1 Металлургические аспекты применения углеродсодержащих огнеупоров в футеровках сталеразливочных ковшей**

Сталь, выплавляемая в сталеплавильных агрегатах, транспортируется к разливочным отделениям и машинам непрерывного литья заготовок посредством сталеразливочных ковшей. С развитием технологий внепечной обработки, в сталеразливочных ковшах проводят подогрев, рафинирование, модифицирование, микролегирование, вакуумирование и ряд других технологических операций ковшевой доводки стали [1 – 3]. Расширение функциональных возможностей ковшей привело к росту температур и агрессивного воздействия расплавов стали и шлака на огнеупорную футеровку. В таких условиях обострилась проблема не только ресурсосбережения, т.е. удельного расхода ковшевых огнеупоров на тонну выплавляемой стали и качества металла по неметаллическим включениям, но и безопасности производства, в связи с появлением случаев разрушения ранее используемых алюмосиликатных и основных огнеупоров вследствие коррозии и эрозии расплавами стали и шлака [4, 5]. В связи с этим в настоящее время наибольшее распространение для выполнения рабочих слоев футеровок сталеразливочных ковшей получили углеродсодержащие – периклазоуглеродистые и алюмопериклазоуглеродистые безобжиговые смолосвязанные огнеупоры, в состав которых для снижения смачиваемости расплавами стали и шлака вводят чешуйчатый графит [5 – 7]. В огнеупорах для футеровки шлакового пояса ковшей содержание углерода обычно не превышает 15 %. Для футеровки стен ковшей применяют огнеупоры с содержанием углерода, как правило, не более 10 %.

Несмотря на существенный прогресс в области создания новых высоко-стойких ковшевых огнеупоров, затраты на футеровку сталеразливочных ковшей в цикле производства стали остаются по-прежнему весьма высоки. В частности, по данным одного из ведущих отечественных производителей огнеупоров ООО «Группа «Магнезит»», затраты на огнеупоры, применяемые в футеровке сталераз-

ливочных ковшей, составляют 40 – 50 % от затрат всего сталеплавильного комплекса на огнеупоры основного состава [8]. На Челябинском металлургическом комбинате расход огнеупоров на сталеразливочные ковши достигает 58 % от общего расхода огнеупоров в кислородно-конвертерном цехе [9]. В работах [10, 11] представлены данные по Нижнетагильскому металлургическому комбинату, которые свидетельствуют о том, что на долю сталеразливочных ковшей приходится до 30 – 35 % от общих затрат металлургического предприятия на огнеупорные материалы, а в структуре затрат на огнеупоры доменного и конвертерного цехов огнеупоры для сталеразливочных ковшей составляют 39 %.

Прогнозирование поведения огнеупоров в реальных условиях эксплуатации – весьма ответственный момент при подборе или разработке материалов для футеровки металлургических агрегатов, поскольку имеет не только чисто технический, но и экономический аспект – оптимизация затрат на выплавку стали [12].

В последнее десятилетие усилия отечественных и зарубежных ученых были направлены на разработку мер, обеспечивающих снижение удельных расходов ковшевых огнеупоров.

В общем случае на стойкость футеровки сталеразливочных ковшей влияют: дизайн ковшей, качество огнеупорных изделий, состав шлака и температурные режимы эксплуатации. Полученные в работе [13] результаты подтверждают, что для повышения стойкости сталеразливочных ковшей необходим комплексный подход, направленный на повышение качества огнеупорных изделий, улучшение дизайна футеровки и совершенствование технологии наведения рафинировочного шлака. Следует отметить, что на практике сталеразливочный ковш выводят по достижении гарантированной стойкости или локального повышенного износа огнеупорных изделий из-за нарушения условий эксплуатации, некачественного выполнения футеровки и при низких качественных показателях огнеупорных изделий.

Существенного прогресса в области ресурсосбережения и повышения продолжительности межремонтного срока эксплуатации удалось достичь посредством применения дифференцированных, равностойких футеровок, в которых

каждый элемент (шлаковый пояс, стены, дно, сталевыпускные отверстия и т.п.) обеспечивают по возможности определенную заданную стойкость [14 – 16]. При таком комплексном подходе в дизайне ковшевой футеровки отдельные ее элементы выполняют из огнеупоров различного состава, адаптированных к характерным разрушающим воздействиям (химическому составу шлака, термическим напряжениям, размывающему воздействию падающей струи и т.п.). В итоге вывод ковша из эксплуатации проводят при равновеликом износе отдельных элементов, а не по причине износа локального участка при возможности дальнейшей эксплуатации остальных. В противном случае вследствие неравномерного износа отдельных элементов футеровки наблюдается повышенный расход огнеупоров. В частности по данным [17] на ОАО «Белорусский металлургический завод» при первоначальной толщине рабочего слоя 180 мм в отдельных зонах футеровки при выводе ковша из эксплуатации наблюдается остаточная его толщина 120 – 150 мм, а в зонах повышенного износа менее 60 мм, что недопустимо для дальнейшей безаварийной эксплуатации.

Применение в футеровках ковшей углеродсодержащих огнеупоров выявило весьма важный их недостаток, проявляющийся в выгорании углерода при взаимодействии с окислительной средой. Обезуглероженные слои огнеупора обладают повышенной пористостью, низкой прочностью, смачиваются расплавами стали и шлака и гораздо более интенсивно изнашиваются, чем не обезуглероженные. Различные ученые придерживаются единого мнения, что первой стадией разрушения углеродсодержащих огнеупоров является именно обезуглероживание (окисление углеродного скелета и чешуйчатого графита) при взаимодействии с кислородом (или другими окислительными газами  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), содержащимися в газовой атмосфере (при разогреве футеровок на стендах или охлаждении при ожидании приема расплава) или присутствующим в расплавах стали и шлака [6, 7, 18].

Анализ специальной технической литературы и опыт работы российских предприятий, производящих сталь, показывает, что стойкость углеродсодержащей футеровки сталеразливочных ковшей и агрегатов ковш-печь может дости-

гать 80 – 100 плавов, а при контакте расплава с футеровкой ее износ в среднем достигает 1 мм за плавку. В тоже время при эксплуатации ковшей наблюдается следующее характерное явление. После изготовления новой футеровки (капитального ремонта) или полной замены рабочего слоя ковш подвергают сушке и первому предплавочному разогреву. Продолжительность предплавочного разогрева в среднем достигает от 12 до 24 ч, а температура разогрева футеровки находится на уровне 1000 – 1200 °С. Разогрев футеровки обычно производят на специальных стендах, оборудованных газовыми горелками, а нагрев фактически осуществляют раскаленными продуктами сгорания газообразного топлива (обычно природного газа). При этом в полости ковша формируется окислительная атмосфера продуктов сгорания, которые содержат газы окислители:  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и в некоторых случаях  $SO_2$ . Проведенные в работах [19 – 22] промышленные и лабораторные исследования показывают, что при первом разогреве новой футеровки вследствие высокотемпературного окисления углерода (графита) в атмосфере продуктов сгорания на поверхности огнеупора формируется полностью обезуглероженный слой. В зависимости от применяемых огнеупоров, конструкции стенда, горелочного устройства и технологии разогрева глубина обезуглероженного слоя может меняться как по высоте, так и по периметру футеровки, и достигать 10 мм (рис. 1.1) [19].



Рисунок 1.1 – Внешний вид обезуглероженного слоя (светлый)  
в поперечном сечении периклазоуглеродистого огнеупора  
после первого разогрева перед приемом расплава стали

При контакте с жидкой сталью обезуглероженный слой огнеупора интенсивно размывается расплавом в процессе 1 – 2 наливов, что может привести к загрязнению стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения.

Очевидными последствиями этого явления служат:

1) *Сокращение стойкости футеровки примерно на 10 плавов* (если принять во внимание, что при контакте необезуглероженной футеровки с расплавом износ достигает 1 мм за плавку). Характерным является тот факт, что это сокращение predetermined еще до приема новой футеровкой первой плавки стали. Таким образом, ресурс огнеупора понижается на 10 % еще до ввода футеровки в непосредственную эксплуатацию.

2) *Загрязнение расплава неметаллическими включениями*. Анализ геометрических размеров 130-т сталеразливочных ковшей показывает, что обезуглероживание рабочего слоя футеровки на глубину 10 мм приводит к повреждению примерно  $0,35 \text{ м}^3$  огнеупоров, это эквивалентно, в зависимости от размеров, 80 – 100 кирпичам, используемым для изготовления футеровки. При контакте с жидкой сталью обезуглероженный слой огнеупора интенсивно размывается расплавом в процессе 1 – 2 наливов.

3) *Повышенный расход огнеупоров*. При сохранении одинаковой стойкости, в случае исключения обезуглероживания огнеупора при первом разогреве, толщина рабочего слоя могла бы быть меньше на 10 мм, т.е. для выполнения рабочего слоя возможно использование кирпичей толщиной, например не 200 мм, а 190 мм.

4) *Снижение вместимости ковша*. Если толщину рабочего слоя футеровки уменьшить на 10 мм, то емкость, например 130-т ковша возрастет на  $0,35 \text{ м}^3$ , т.е. почти на 2,5 т.

В работах М.В. Темлянцева, М.В. Матвеева [19 – 23] исследована кинетика обезуглероживания периклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров массового производства, установлено, что зависимость глубины обезуглероженного слоя от времени выдержки при температурах 1000 – 1200 °С имеет вид, близкий к закону квадратного корня, это свидетельствует о том, что обезуглероживание огнеупора



лимитировано процессами диффузии. При увеличении глубины обезуглероженного слоя интенсивность обезуглероживания снижается, поскольку этот слой является барьером, препятствующим диффузии окислительных газов к неизменной зоне огнеупора и газообразных продуктов реакции окисления углерода в атмосферу.

При выявлении зависимостей окисления периклазоуглеродистых огнеупоров в атмосфере воздуха и продуктов сгорания природного газа установлено, что строение поверхностных слоев образцов идентично [19].

Рентгенофазовый анализ периклазоуглеродистых огнеупоров свидетельствует о том, что исходный огнеупор в основном содержит периклаз и графит, в небольших количествах – металлический кремний и рентгеноаморфное вещество, и др. примеси, обезуглероженный слой в основном содержит периклаз и рентгеноаморфное вещество. РФА подтвердил, что углерод (графит) в обезуглероженном слое отсутствует [19].

Сведения о кинетике обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров массового производства фактически полностью отсутствуют. В то же время известно, что в зависимости от химического и фазового состава таких огнеупоров окислительные процессы начинают протекать уже при 240 – 275 °С, а наибольшая интенсивность этих процессов наблюдается при 570 – 695 °С [24].

В работе [13, 25] рассмотрено влияние технологических факторов на износ алюмопериклазоуглеродистых огнеупорных изделий в сталеразливочном ковше. Установлено, что:

- наименее подвержены износу огнеупорные изделия более высокого качества, установленные в боевом утолщении (боевой плите);
- увеличение температуры и длительности нахождения металла и шлака в ковше увеличивают износ огнеупорных изделий;
- повышенное содержание оксидов магния и кальция в шлаке снижают износ футеровки.

Алюмопериклазоуглеродистые и периклазоалюмоуглеродистые изделия системы  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{C}$  по сравнению с периклазоуглеродистыми изделиями системы  $\text{MgO} - \text{C}$  имеют ряд существенных отличий в процессах, протекающих при их высокотемпературном нагреве. При нагреве алюмопериклазоуглеродистых и периклазоалюмоуглеродистых огнеупоров формируется шпинель, обеспечивающая эффективное остаточное тепловое расширение. Такое поведение материала закрывает стыки между кирпичами футеровки и снижает проникновение шлака [26]. Чем выше содержание магнезии, тем выше коррозионная стойкость, но и выше коэффициент теплового расширения. Высокий коэффициент теплового расширения вызывает трещины и снижает срок службы огнеупоров.

В процессе нагрева, эксплуатации и охлаждения футеровки сталеразливочных ковшей из углеродсодержащих огнеупоров испытывают значительные термические напряжения, которые приводят к образованию трещин, сколов, отслоений, что вызывает снижение срока службы огнеупора. Так как линейное и объемное расширение с «горячей» стороны огнеупора максимально, возникают напряжения, которые вызывают образование зародышей микротрещин. В дальнейшем они развиваются до крупных трещин, приводящим к сколам граней в зонах сопряжения огнеупоров кладки [27]. После нагрева футеровки тепловой поток становится более постоянным, что создает равномерное распределение напряжений, возникающих в огнеупорах (стационарный тепловой режим). Окончательным этапом, при котором возникают значительные термические напряжения, является охлаждение (тепловой режим охлаждения). В этот период объемные и линейные расширения изделий, различающиеся в радиальном направлении в зависимости от глубины прогрева огнеупора от «горячей» стороны к «холодной», значительны. Они обусловлены высокой температурой и присутствием значительного диффузионного слоя, как обезуглероженного, так и частично пропитанного продуктами плавки.

В работах [27, 28] рассмотрена проблема развития локального (дырочного) износа периклазоуглеродистой футеровки вследствие термомеханических нагрузок (механический характер проявления). Проявление локального износа (рис. 1.2)

наблюдается преимущественно по швам между штучными изделиями в рабочем слое футеровки сталеразливочного ковша.

Основной причиной такого износа служит совокупность термомеханических нагрузок в процессе эксплуатации ковша. При термическом воздействии на футеровку возникают пластическая деформация и термическое расширение, которые приводят к растрескиванию огнеупора. На процесс термомеханического образования «дырочного» износа значительно влияет этап нагрева футеровки.



Рисунок 1.2 – Локальный (дырочный) износ периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша

Отмечено [27, 28], что при использовании бетонных наливных арматурных слоев для сталеразливочных ковшей при технологии заливки бетона за уже собранный рабочий слой также наблюдается значительный опережающий износ в зонах стыка кладки за счет «дырочного» износа, снижающего общую стойкость кампании сталеразливочного ковша на 20 – 30 %. Это обусловлено тем, что в процессе нагрева футеровки на новом арматурном слое происходит удаление воды не только через выпарные отверстия металлического кожуха сталеразливочного ковша, но и по щелям кладки. При высоких (более 700 °С) температурах сушки водяной пар начинает окислять тонкие фракции графита, которые, как правило, при формовании кирпича распределяются совместно с тонкими фракциями периклаза на периферию формы, то есть на грани кирпича. Частичное обезуглероживание в данной зоне вызывает термомеханические напряжения между науглероженным и обезуглероженным слоями, интенсифицируя тем самым процесс разрушения огнеупора в виде «дырочного» износа. Кроме того, на

образование «дырочного» износа существенно влияет окислительный потенциал (обезуглероживание) футеровки, особенно в процессе межплавочной подготовки сталеразливочного ковша (уход за сталевыпускным и продувочными узлами). Происходит охлаждение рабочего слоя футеровки ковша до 850 – 950 °С (в отдельных случаях до 700 °С). Этот период характеризуется изменением объема (усадкой) рабочего слоя футеровки, что приводит к раскрытию швов кладки, а значит, к увеличению поверхности контакта огнеупора с окислительной атмосферой (кислородом воздуха). При последующем разогреве сталеразливочного ковша до температуры приема металла происходит обезуглероживание не только со стороны рабочей поверхности (поверхность, контактирующая с расплавом), но и в зонах сопряжения огнеупоров вдоль швов кладки на глубину раскрытия швов. Обезуглероженный слой огнеупора характеризуется пониженной прочностью и повышенной пористостью, поэтому способствует износу продуктами плавки именно в рассматриваемой зоне. При значительном «дырочном» износе вглубь кладки значительно повышается вероятность раскрытия шва со стороны арматурного слоя футеровки, которое приводит к инъекции воздуха (через выпарные отверстия) в направлении «горячей» стороны кладки и повышает вероятность прорыва металла. Следует отметить и то, что такой сценарий развития событий несет в себе большую вероятность образования аварийных ситуаций за счет непредсказуемости размывания по локальной зоне в толщине кирпичной кладки. Образовавшиеся пустоты условно разделяют огнеупор на две зоны: первая (рабочая) зона расположена со стороны расплава; вторая («тыльная») зона прилегает к арматурному слою футеровки. В процессе эксплуатации ковша с каждой последующей плавкой размывание интенсифицируется и его обнаружение уже зависит от квалификации персонала, обслуживающего сталеразливочный ковш. В ходе исследований [27, 28] были установлены зоны наиболее частого проявления локального (дырочного) износа из-за обезуглероживания рабочего слоя футеровки в процессе эксплуатации. К ним относятся: зона падения струи металла и зоны расположения ребер жесткости.

В работе [29] в результате исследования опыта применения периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров в сталеразливочных ковшах 31 металлургического предприятия проведен сравнительный анализ особенностей эксплуатации и механизмов износа.

Для периклазоуглеродистых огнеупоров характерно снижение коэффициента теплопроводности с ростом температуры, а для алюмопериклазоуглеродистых – увеличение. При этом для алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров не характерна зональная структура, которая является типичной для периклазоуглеродистых огнеупоров [30].

В процессе эксплуатации у футеровок из алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров отсутствует износ по типу «булыжника» (рис. 1.3, *а*), для них характерна монолитоподобная структура (рис. 1.3, *б*), в которой на определенной глубине футеровки материал спекается и уплотняется [29].

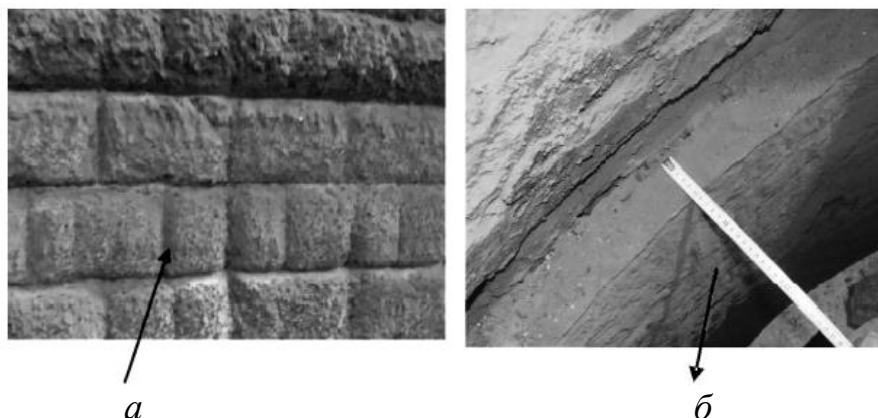


Рисунок 1.3 – Характерный вид футеровки сталеразливочных ковшей из периклазоуглеродистых (*а*) и алюмопериклазоуглеродистых (*б*) огнеупоров после продолжительной эксплуатации [29]

У периклазоуглеродистых огнеупоров из-за снижения теплопроводности с увеличением температуры и в силу зональности структуры напряжения, возникающие в кирпиче, намного больше, чем у алюмопериклазоуглеродистых, соответственно горячая обезуглероженная зона кирпича, расширяется сильнее, чем более «холодные» зоны. Это приводит к скалыванию углов и ребер кирпичей в

конечном итоге формированию износа по типу «булыжник» [29]. Для периклазоуглеродистых ковшевых футеровок характерно раскрытие горизонтальных и вертикальных швов (рис. 1.4), образование трещин и проход металла в них [30].

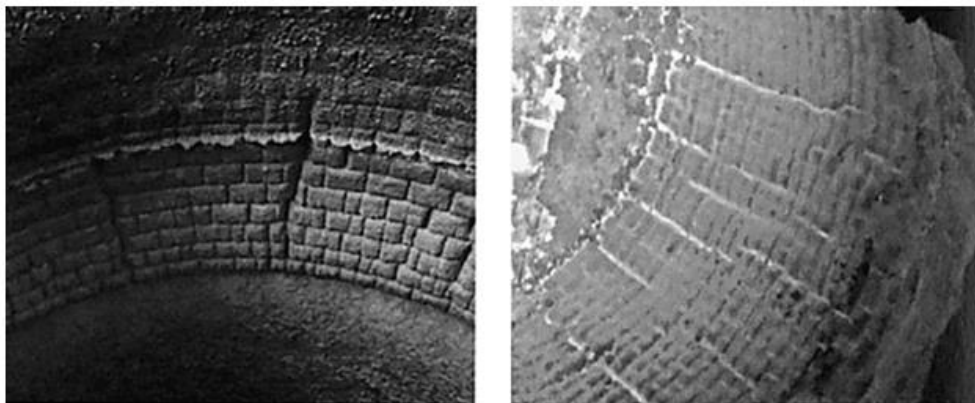


Рисунок 1.4 – Раскрытие швов футеровки и образование трещин [30]

Типичная зональная структура периклазоуглеродистых огнеупоров является причиной структурного скалывания при колебаниях температуры. В связи с этим для таких огнеупоров не рекомендуется прием расплава с температурной футеровки менее  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ее охлаждение ниже  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  более 2 – 4 раз за кампанию ковша [29].

Алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры изготавливают из корундсодержащего сырья, с добавками периклаза, шпинели и графита, такой гетерогенный состав и значительное количество примесей приводит к снижению их коррозионной стойкости, которая у периклазоуглеродистых огнеупоров, состоящих из высокоогнеупорного периклаза, углерода и антиоксиданта существенно выше [29].

Для предотвращения окисления углерода в углеродсодержащих огнеупорах и футеровках на стадии разогрева существует ряд методов и способов:

1) введение в состав огнеупора антиоксидантов [31 – 37]. Типичными антиоксидантами являются порошки металлов Si, Al, Mg, их соединения SiC,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{Al}_4\text{SiC}_4$ ,  $\text{Al}_8\text{B}_4\text{C}_7$ , борсодержащие добавки (диборид титана, диборид магния, нитрид бора) и др., их эффект основан на связывании кислорода и предотвращении окисления им углерода огнеупора [31]. Антиоксиданты как правило эффек-

тивно действуют в определенном температурном интервале, так при температурах 400 – 800 °С диборид титана снижает окисляемость углерода, начиная с 500 – 700 и до 1000 °С металлический алюминий. При температуре, превышающей 1200 °С кремний снижает интенсивность обезуглероживания, при температуре свыше 800 °С начинается окисление карбида кремния, при этом величина антиокислительного действия добавки кремния и карбида кремния фактически одинаковы [32 – 36];

2) применение на поверхности огнеупоров защитных покрытий [18, 38 – 46] предотвращающих доступ окислительных газов к поверхности огнеупора на стадии разогрева футеровок на стендах. Весьма перспективными для ковшевых футеровок являются покрытия с переменным агрегатным состоянием, предложенные в работе М.В. Матвеева [19]. При температурах 20 – 600 °С такие покрытия находятся в твердом состоянии, в них присутствуют открытые канальные поры, что обеспечивает беспрепятственное удаление влаги и летучих веществ из огнеупора при первом разогреве новой футеровки. При температурах более 600 °С покрытие переходит в жидкое, вязкое, пластичное состояние и образует на поверхности огнеупора газонепроницаемую пленку, предотвращающую обезуглероживание [19];

3) применение малообезуглероживающих температурных режимов разогрева [19] основано на снижении отрицательного воздействия температурно-временного фактора при разогреве футеровки на стенде посредством сокращения продолжительности горячей консервации ковшей и снижения окислительного потенциала атмосферы внутри ковша. Анализа зависимости стойкости футеровки от времени горячего резервирования ковша проведенный по результатам работы [47] показывает, что увеличение времени горячего резервирования на 12 ч приводит к снижению стойкости футеровки примерно на одну плавку [19]. В работе [19] на основе оценки удельной величины (продолжительности кампании ковша, приходящейся на одну плавку для 130-т сталеразливочных ковшей электросталеплавильного цеха) установлено, что сокращение времени кампании (за счет снижения продолжительности «горячих простоев»), приходящееся на одну плавку с 0,6 до 0,3 сут./плавку (в 2 раза), повышает стойкость футеровки при-

мерно с 50 до 85 плавов (в 1,7 раза). Таким образом, сокращение времени «горячих» простоев ковшей перед приемом расплава, времени разогрева футеровки, простоев ковша после разливки является мощным фактором по повышению стойкости футеровки. Для этого требуется повышение уровня организации и ритмичности производства [19]. На ЧАО «ЕМЗ» для предотвращения обезуглероживания периклазоуглеродистой футеровки при длительном нахождении новых ковшей в режиме разогрева или горячей консервации принят регламент принудительного ввода их в эксплуатацию [48]. Характерно, что при этом новая футеровка проходит не менее пяти плавов (наливов) после чего на ее поверхности образуется защитный спеченный слой, который препятствует ускоренному износу огнеупоров в случаях длительного горячего резервирования [48]. Определенного успеха в реализации этого направления можно достичь при применении электрических стенов разогрева, в которых источниками выделения тепла являются нагреватели из карбида кремния Globar [49 – 53]. Температурный режим электрического стенов разогрева регулируется точнее, чем газового, поскольку регулируемым параметром является напряжение, а не расход газа [52]. При достаточной мощности электростенов имеется возможность реализовать форсированный разогрев в области температур интенсивного окисления углерода огнеупора, тем самым снизить отрицательное воздействие температурно-временного фактора. В электростенов имеются более широкие возможности регулирования состава атмосферы во внутреннем пространстве ковша и снижения ее окислительного потенциала [49 – 53]. При нагреве футеровки до 1400 °С с помощью электронагревателей общие потери тепла расплава стали находящегося в ковше снижаются с 3,32 до 2,41 ГДж по сравнению с нагревом газовой горелкой до 1100 – 1200 °С [49 – 51]. Это позволяет снизить температуру металла на выпуске из дуговой сталеплавильной печи на 30 °С и более. Благодаря этому и другим преимуществам использование электронагревателей для высокотемпературного нагрева ковшей экономически эффективнее, чем газовый нагрев. Сравнение капитальных затрат на установку новых электростенов, на основе примеров из зарубежного опыта, подтверждает их конкурентоспособность [49 – 51].



## **1.2 Влияние углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей на загрязненность стали неметаллическими включениями**

Одной из основных задач создания прогрессивных футеровок сталеразливочных ковшей является минимизация загрязнения расплава стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения. В соответствии с существующей классификацией неметаллические включения футеровочного происхождения относятся к типу экзогенных [54 – 59]. Идентификация неметаллических включений, источником которых является именно футеровка сталеразливочного ковша, весьма затруднена, поскольку соединения оксидов магния и алюминия могут содержаться в футеровке сталеплавильного агрегата, промежуточного ковша, печного или ковшевого шлака и применяемых раскислителей.

Механизмы возникновения и особенности поведения неметаллических включений в расплавах стали и при ее кристаллизации рассмотрены в работах [54 – 64]. По данным работы [62] в трубной стали, для раскисления которой применялся алюминий, доля неметаллических включений футеровочного происхождения от их общего количества достигает 24 %.

В области повышения качества стали по неметаллическим включениям наблюдаются две основные тенденции. Первая связана с уменьшением их образования (т.е. борьба с источником проблемы) и вторая – принятие мер по удалению образовавшихся неметаллических включений из стали (т.е. борьба с последствиями проблемы). В отношении ковшевых огнеупоров как источника неметаллических включений успешно реализуются оба этих направления.

Ряд ученых придерживается позиции, что неметаллические включения футеровочного происхождения характеризуются достаточно большими размерами и без особых затруднений ассимилируется шлаком [56] при внепечной обработке расплава. К тому же частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  обладают высоким уровнем межфазной энергии на границе частица – металлический расплав, поэтому при размерах больше критического в большинстве своем достаточно быстро экстрагируются из расплава [65].

Автор работы [29], анализируя материалы работы [66], придерживается мнения, что с точки зрения загрязнения стали неметаллическими включениями оксид магния в процессе службы футеровки не может перейти в сталь, однако элементы алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров переходят в сталь. Периклазоуглеродистые огнеупоры используют для разливки специальных сталей (кордовых, трубных, рельсовых и др.).

Особого внимания заслуживают исследования загрязненности расплава неметаллическими включениями в зависимости от продолжительности эксплуатации футеровки ковша [67]. В производственной практике фактически повсеместно используют так называемую «омывку» ковша, когда в ковш с новой футеровкой производят несколько выпусков расплава (наливов) рядовых марок сталей, качество которых по неметаллическим включениям не регламентировано. Учитывая процессы обезуглероживания углеродсодержащих огнеупоров «омывка» для таких футеровок особенно актуальна, поскольку как было отмечено выше, для 130-т ковша при глубине обезуглероженного слоя в 10 мм существует вероятность разрушения в первые несколько наливов до  $0,35 \text{ м}^3$  огнеупоров.

Исследования, проведенные в работе [19] убедительно доказали роль процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров в формировании неметаллических включений футеровочного происхождения. В частности установлено, что при эксплуатации ковшевых периклазоуглеродистых огнеупоров максимальное поступление неметаллических включений футеровочного происхождения в расплав стали соответствует 3 – 5 наливам ковша. Однако, для условий производства стали на исследуемом предприятии, максимальное развитие процесса разрушения обезуглероженного слоя при 3 – 5 наливах не оказывает существенного влияния на конечную загрязненность стали неметаллическими включениями, поскольку при последующих внепечной обработке, вакуумировании и разливке они, имея достаточно крупные размеры, всплывают и ассимилируются шлаком [19].

### **1.3 Теплотехнологии и конструкции стендов для разогрева углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей**

Перед приемом жидкого металла новые (после капитального ремонта) периклазоуглеродистые и алюмопериклазоуглеродистые футеровки сталеразливочных ковшей подвергают разогреву, который преследует три основные цели:

- термическая обработка безобжиговых смолосвязанных углеродсодержащих огнеупоров рабочего слоя с целью формирования необходимой структуры и свойств огнеупора (коксования, формирования углеродного каркаса);
- снижение скорости охлаждения жидкой стали вследствие аккумуляции тепла кладкой;
- уменьшение интенсивности теплового удара, который испытывают огнеупоры при заливке расплава.

Разогрев футеровок производят на специальных стендах. Конструкции стендов, эксплуатируемых в 70 – 80-е гг. прошлого века были весьма несовершенны. Как правило они обеспечивали разогрев футеровки всего до температуры 800 – 900 °С, не предусматривали подогрев воздуха, подающегося на горение, не были оборудованы крышкой, или она представляла собой стальную теплоотражающую плиту без теплоизоляции, продукты сгорания удалялись в пространство между крышкой и ковшом непосредственно в помещение цеха. Коэффициент полезного действия (КПД) стендов такой конструкции обычно не превышал 10 – 20 % [68].

По мере развития ковшевой металлургии произошел переход на применение в футеровке ковшей новых, более стойких огнеупоров – сначала пекодоломитовых, периклазоизвестковых, а в 2000-х гг. углеродсодержащих (периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых безобжиговых огнеупоров) [69].

Повсеместное распространение процессов внепечной обработки стали значительно расширило функции сталеразливочных ковшей и привело к увеличению времени нахождения расплава в ковше, а соответственно и к дополнительному снижению его температуры на величины до 100 °С.

Указанные факторы привели к существенным изменениям конструкций стенов для разогрева ковшевых футеровок. Помимо достижения необходимых параметров (скорости, равномерности, конечной температуры разогрева) качества нагрева футеровки конструкции стенов развивались в направлении повышения энергоэффективности, коэффициента полезного действия, а также сокращения расхода топлива. Одним из наиболее важных направлений в таких условиях становится высокотемпературный разогрев футеровок ковшей до температур не менее 1100 – 1200 °С. Повышение температур разогрева футеровок позволяет (при прочих равных условиях) снижать температуры перегрева расплава стали при выпуске из сталеплавильного агрегата, повышая его производительность, стойкость футеровки, а для дуговых печей и конвертеров – экономию электроэнергии и чугуна соответственно.

По данным работы [70] применение футерованных крышек позволяет на 10 – 30 °С снизить температуру стали на выпуске, сократив тем самым длительность плавки и износ печных огнеупоров, повысить в 4 раза стойкость футеровки ковша, стабилизировать температуру металла в процессе разливки и на 0,3 – 0,6 % увеличить выход годных заготовок. По данным [51] до 50 – 80 % тепловых потерь металла при выпуске из плавильного агрегата и выдержке в ковше происходит из-за аккумуляции тепла футеровкой.

Затраты энергии на повышение температуры футеровки ковша с 1100 до 1200 °С в 20 раз меньше, чем при эквивалентном по эффективности нагреве стали в печном агрегате от 1500 до 1520 °С [70].

При конвертерном производстве стали применение высокотемпературного разогрева футеровки ковша и снижение температуры металла перед выпуском из конвертера на 10 – 20 °С обеспечивает экономию чугуна в количестве 6 – 12 кг/т стали [70].

По данным [71] повышение температуры футеровки ковша перед заливкой стали с 900 до 1200 °С приводит к уменьшению расхода электроэнергии на 10 % и увеличению стойкости футеровки на 3 – 5 % для ковш-печи.

В настоящее время наибольшее распространение получил высокотемпературный разогрев футеровки до температуры 1100 – 1200 °С, для осуществления которого применяют газовые стенды, отапливаемые природным газом, или электрические стенды с неметаллическими нагревателями [3, 49].

Мировые тенденции повышения тепловой эффективности показывают, что конструкции стендов в основном развиваются в направлении снижения различного вида потерь тепла (с уходящими продуктами сгорания; теплопроводностью через стенку, дно, крышку; с выбиваниями и излучением через технологические отверстия), применения эффективных горелочных устройств, обеспечивающих полное сжигание топлива и высокоинтенсивную циркуляцию продуктов сгорания в полости ковша, обогащения дутья кислородом (с учетом экономического фактора) и применения энергосберегающих режимов разогрева, минимизирующих расходы топлива (рис. 1.5) [72].

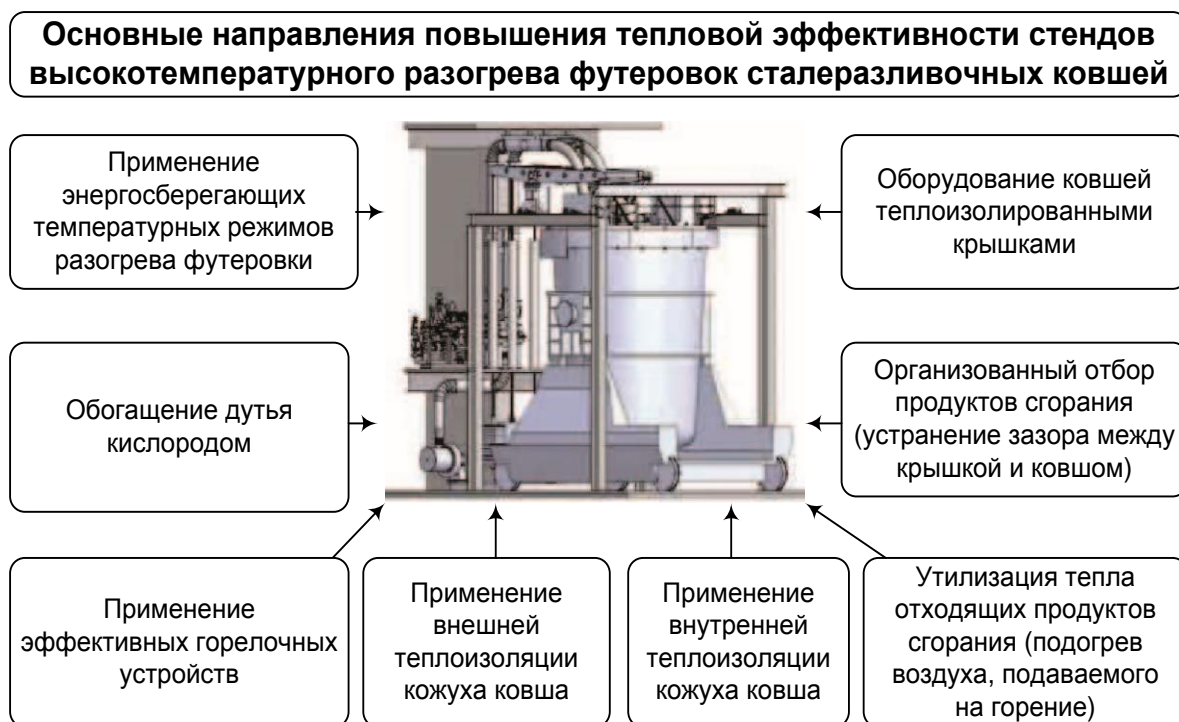
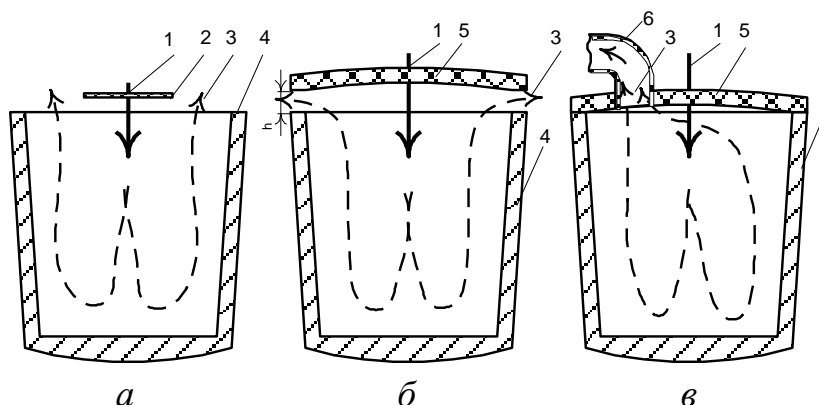


Рисунок 1.5 – Основные направления развития конструкций стендов и технологий высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей

Каждое из направлений характеризуется рядом преимуществ и недостатков. В частности, оборудование ковшей крышками применяли уже на начальном этапе развития стандов, однако обычно их оборудовали стальными крышками без теплоизоляции, которые в процессе разогрева нагревались до температур 700 – 800 °С. Крышки играют роль теплоотражающих экранов (рис. 1.6, *а*). Такая конструкция характеризуется высокими потерями тепла с излучением от футеровки через открытое пространство между крышкой-экраном и ковшом, а также непосредственно от самого экрана. Последний, разогретый до указанных температур, в процессе эксплуатации часто деформировался, окислялся и имел малый срок службы [72].

Позже распространение стали получать футерованные или теплоизолированные крышки (рис. 1.6, *б*) [73]. Они имеют стальной каркас, который внутри футерован легковесным бетоном или теплоизолирован волокнистыми материалами. В такой конструкции продукты сгорания удаляются в пространство между крышкой и ковшом, расстояние  $h$  между которыми обычно равно 200 – 300 мм. При этом часть тепла футеровки теряется излучением через зазор, а часть тепла – теплопроводностью через крышку. Тем не менее, эти потери значительно меньше, чем при использовании конструкции, представленной на рис. 1.6, *а*.



- 1 – горелка; 2 – стальной теплоотражающий экран без теплоизоляции;  
3 – продукты сгорания; 4 – ковш; 5 – теплоизолированная крышка;  
6 – дымопровод

Рисунок 1.6 – Различные варианты конструкции крышек и организации удаления продуктов сгорания

Наиболее перспективной является конструкция, представленная на рис. 1.6, в. Ее особенностью является герметичное прилегание крышки к ковшу и соответственно полное отсутствие зазора между ними. Продукты сгорания удаляются через футерованный дымоотводящий тракт в крышке. При такой конструкции потери тепла излучением практически равны нулю.

По данным работы [68] переход от конструкции стенов, представленной на рис. 1.6, а, к конструкции, рассматриваемой рис. 1.6, б, позволяет в некоторых случаях повысить КПД примерно с 10 до 55 – 65 % и сократить расход топлива на разогрев почти в 4 раза.

Теплоизолированные крышки часто применяют не только на стендах, но и вне стенда при простое горячего ковша [74].

Утилизация тепла отходящих продуктов сгорания посредством подогрева окислителя хорошо известна и широко используется в нагревательных печах. При всей очевидности его эффективности на стендах подогрев окислителя активно начал применяться только в последнее время. Для подогрева окислителя подаваемого на горение используют рекуператоры, устанавливаемые в дымоотводящий тракт. На некоторых стендах применяют горелки, предусматривающие подогрев окислителя. Температура  $t_{ок}$  подогрева окислителя составляет 100 – 400 °С [68]. Использование рекуперации тепла отходящих газов обеспечивает экономию топлива от 15 до 25 % [75].

Одним из направлений повышения тепловой эффективности стенов и экономии природного газа является обогащение воздуха, идущего на горение, кислородом [76]. Вопросы применения обогащения дутья кислородом в нагревательных устройствах рассмотрены в работе [77]. Ведущие фирмы, занимающиеся конструированием стенов, предлагают достаточно широкий спектр стенов с дополнительной подачей кислорода [78, 79]. Однако в силу ряда причин такие стеновы получили ограниченное распространение. По данным работы [80], применение на стендах сушки и разогрева топливно-кислородных горелок, вместо топливно-воздушных, обеспечило повышение температуры нагрева футеровки с 1010 до 1288 °С, что позволило снизить температуру стали на выпуске из пла-

вильного агрегата на 40 °С, при этом эффект от экономии природного газа и электроэнергии составил 0,29 долл./т стали.

С целью снижения тепловых потерь через футеровку ковша в ней предусматривают теплоизоляционный слой, расположенный между кожухом и арматурным слоем кладки. Такую теплоизоляцию относят к типу внутренней. Для снижения тепловых потерь через футеровку агрегатов возможно применение внешней теплоизоляции, которую могут монтировать к наружной поверхности кожуха [81]. Наиболее перспективным видом внешней теплоизоляции можно считать пеноизоляцию или теплоизоляционную пену, наносимую методом торкретирования.

Применение внешней теплоизоляции для футеровок сталеразливочных ковшей имеет определенные ограничения. В частности, в процессе службы ковша с расплавом температура  $t$  кожуха может возрастать до 350 – 400 °С, что приближается к максимально допустимой температуре службы кожуха, разогрев выше которой может привести к его короблению, потере прочности. Как известно, внешняя теплоизоляция будет способствовать росту температуры кожуха, повышая ее до недопустимых пределов.

Важной особенностью экранирования кожухов является то, что оно позволяет улучшить прогрев футеровки без изменения ее конструкции и теплового режима работы станда [19]. Для усиления эффекта от применения внешней теплоизоляции возможно применение экранов с «ворсовой» теплоизоляцией, принцип действия которой рассмотрен в работах [82, 83].

Для газовых стандов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей применяются специальные горелочные устройства с широкими пределами регулирования по расходу газа и соотношению расхода газа и окислителя [84 – 86]. Такие требования вызваны обеспечением относительно низкой тепловой мощности и температуры продуктов сгорания на начальной стадии разогрева, включающей сушку футеровки и высокой тепловой мощности и температур на завершающей стадии разогрева. Весьма перспективными являются скоростные горелки, обеспечивающие дополнительную турбулизацию, вы-



сокие скорости потоков продуктов сгорания, увеличение конвективной составляющей в процессах внешнего теплообмена и системы импульсного отопления с применением импульсных горелок [77].

В настоящее время на металлургических предприятиях для высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава применяют горизонтальные и вертикальные стенды различных конструкций отечественного и зарубежного производства. Примеры стендов приведены на рис. 1.7, 1.8 [75, 87].

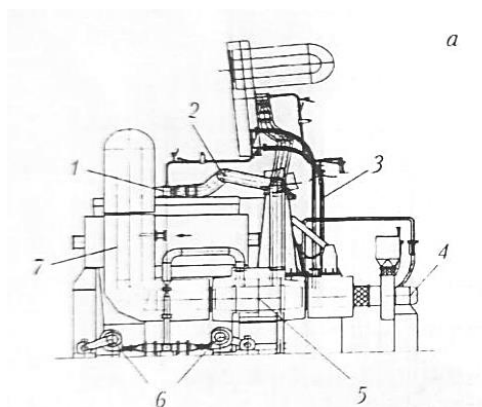


*a*

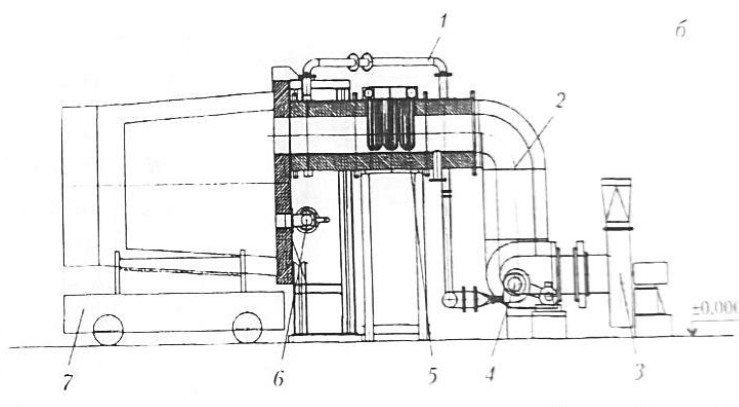


*б*

Рисунок 1.7 – Вертикальный (*a*) и горизонтальный (*б*) стенды марки «PETRONIX» для разогрева футеровки сталеразливочных ковшей



*a*



*б*

*a* – 1 – газовая горелка; 2 – воздухопровод; 3 – газопровод; 4 – дымосос;  
5 – рекуператор; 6 – вентилятор; 7 – дымопровод; *б* – 1 – воздухопровод;  
2 – дымопровод; 3 – дымосос; 4 – вентилятор; 5 – рекуператор;  
6 – газовая горелка; 7 – тележка

Рисунок 1.8 – Вертикальная (*a*) и горизонтальная (*б*) установки для сушки сталеразливочных ковшей

В работе [75] рассмотрены конструкции современных установок для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей для разливки стали: вертикальные – для сушки и нагрева новой футеровки до 800 °С и горизонтальные – для высокотемпературного нагрева футеровки до 1200 °С (рис. 1.8). Рассматриваемые стенды имеют опорную раму, крышки с гидроприводом ее перемещения, систему отопления (горелки, газопровод и воздухопровод с необходимой арматурой), дымопровод с рекуператором, КИПиА с выдачей сигналов АСУТП. В крышке имеются три отверстия для установки горелок и два патрубка с фланцами для отвода дымовых газов. Для сжигания природного газа использованы горелки ВИС 140-RB-0/35-47Е фирмы «Krom Schroder», Германия. Применение таких горелок обусловлено необходимостью иметь возможность десятикратного регулирования расхода газа и обеспечения безопасности процесса горения в условиях низких температур (ниже 800 °С). Данные горелки отвечают всем предъявляемым требованиям, они снабжены системой автоматического розжига и контролем наличия факела горения.

Электрические стенды высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей распространены гораздо меньше, чем газовые. Опыту эксплуатации таких стендов посвящены работы Я.Л. Каца, И.М. Бершицкого и М.В. Краснянского [49 – 53]. В России такие стенды эксплуатируются на заводе «Электросталь» (рис. 1.9) [52].

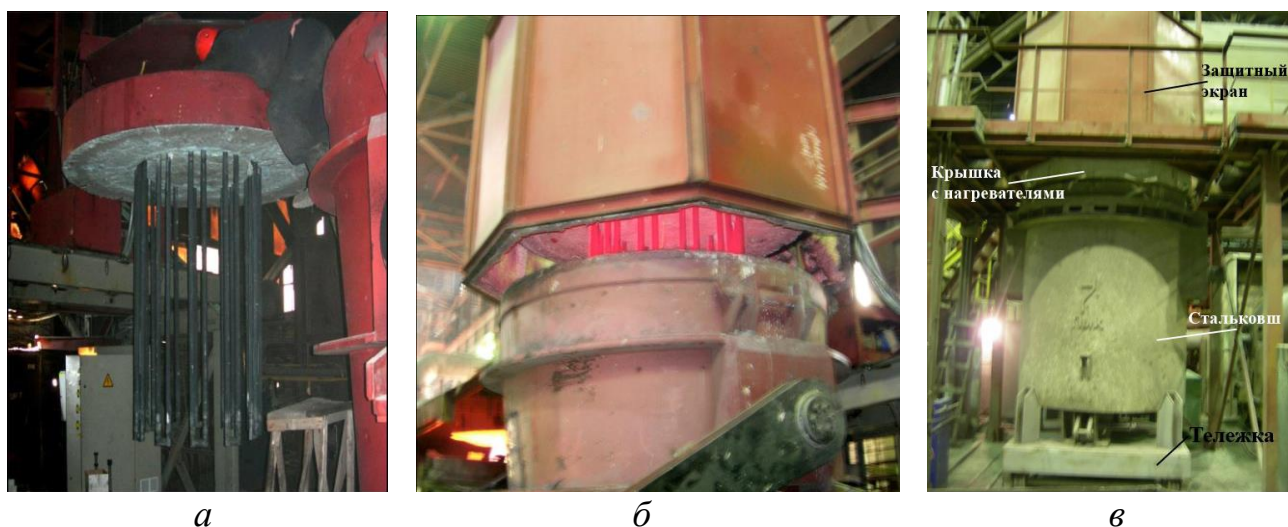


Рисунок 1.9 – Конструкция электростендов для высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей:

а – общий вид электронагревателей, б – защитного экрана, в – стенда с ковшом

#### **1.4 Математическое моделирование тепловой работы стенов высоко-температурного разогрева сталеразливочных ковшей**

Математические модели [88], цифровые «тени» и «двойники» широко применяются при исследовании тепловой работы стенов и футеровок сталеразливочных ковшей, разработке новых и совершенствовании существующих теплотехнологий и конструкций стенов. В зависимости от решаемой научно-практической задачи используют математические модели различной сложности, включающие до нескольких десятков структурных элементов (расчеты внутреннего теплообмена – стационарных или нестационарных температурных полей в многослойной футеровке и расплаве стали, физико-химических процессов обезуглероживания огнеупоров, горения топлива, динамики движения продуктов сгорания в полости ковша, внешнего теплообмена, термонапряженного состояния футеровки и кожуха, теплового баланса стенов и др.).

Математические модели тепловых процессов используют для прогнозирования температурных полей в футеровке ковшей, оптимизации ее конструкции при изменении вида огнеупорных материалов [89].

Стационарные тепловые модели, позволяющие определять температурные поля в ковшевых футеровках, рассмотрены в работах [90, 91]. Нестационарные детерминированные математические модели, основанные на решении дифференциальных уравнений Фурье с допущением постоянной температуры поверхности внутренней изнашиваемой (рабочей) футеровки, что соответствует граничным условиям первого рода, рассмотрены в работах [92 – 94]. Стохастические тепловые модели, основанные на эмпирических данных, рассмотрены в работе [95].

Стационарные тепловые модели имеют более простой математический аппарат, не требуют больших объемов вычислений и применяются для прогнозирования остаточной толщины футеровки по температуре кожуха ковша [91, 96].

Совершенствование предплавочной тепловой обработки ковшей имеет важное значение для рационального использования топлива (и снижения вред-

ных выбросов в окружающую среду) и улучшение эксплуатационных характеристик самих ковшей (повышение стойкости футеровки).

В работе [97] разработана функционально-детерминированная математическая модель процессов сушки и разогрева футеровки сталеразливочных ковшей, базирующаяся на разработанных автором инженерном методе расчета динамики сушки и численном методе нелинейных задач теплообмена. Тепловой поток на внутренней поверхности футеровки ковша определяется результатом сложного лучистого теплообмена в системе «продукты сгорания топлива (факел) – футеровка стен – футеровка днища – крышка (окружающая среда)», а также вынужденной конвекции продуктов сгорания топлива в полости ковша, удаляемых из него через зазор между крышкой и горловиной. Теплоперенос в футеровке происходит за счет нестационарной теплопроводности, теплоотдача от металлического корпуса в окружающую среду – путем излучения и естественной конвекции. Практический интерес с точки зрения повышения эффективности предплавочной подготовки сталеразливочных ковшей представляет информация о структуре их теплового баланса в процессах сушки и межплавочного разогрева, получаемая с помощью разработанной модели [97].

Коллективом ученых уральской школы металлургической теплотехники под руководством Ф.Р. Шкляра разработана детерминированная математическая модель тепловой работы газового стенда сушки и разогрева футеровок сталеразливочных ковшей, позволяющая определить температурный и тепловой режим стенда и расход топлива на его реализацию [98, 99].

Основным фактором, ограничивающим продолжительность технологических операций со сталеразливочными ковшами, является снижение температуры расплава. Для разработки режима внепечной обработки стали необходимо оперативно прогнозировать динамику теплового состояния ковшей в ходе технологических операций [100]. Компьютерная модель обеспечивает отображение динамики температуры расплава в течение времени технологических операций. Входными данными являются температуры окружающей среды, расплава в ковше, слоев футеровки стенки и днища ковша, а также теплофизические констан-

ты. Изменение тепловых потоков от расплава к футеровке стенки и днища ковша, а также с поверхности расплава происходит следующим образом: вначале футеровка принимает на себя ударное тепловое воздействие расплава, а затем основные потери тепла связаны с лучисто-конвективным потоком с поверхности расплава.

В работе [19] рассмотрена детерминированная математическая модель тепловой работы ковшевых футеровок. Модель имеет блочную структуру и позволяет рассчитывать процессы теплогенерации, внешнего теплообмена излучением и конвекцией во внутреннем пространстве ковша, внутреннего теплообмена, нестационарных температурных полей в футеровке, обезуглероживания рабочего слоя футеровки, тепловой баланс процессов разогрева футеровки и охлаждения расплава. На базе разработанной математической модели проведена серия многовариантных расчетов, в результате которых разработаны ресурсосберегающие температурные режимы разогрева периклазоуглеродистых футеровок, рекомендуемые к промышленному использованию [19, 101]. Однако недостатком модели является отсутствие учета в тепловом балансе потерь тепла с водоохлаждаемыми элементами станда, например горелкой.

В работе [102] использована математическая модель, позволяющая рассчитывать термонапряженное состояние футеровки ковша. С применением трехмерной модели линейно упругих конечных элементов рассчитано четыре рабочих цикла сталеразливочного ковша, проведена оценка влияния теплоизоляции. Каждый цикл включал разогрев, налив, внепечную обработку стали, разливку и время простоя. Результаты показали, что минимально необходимое время разогрева составляет 15 – 20 ч. Теплоизоляция играет важную роль, улучшая температурный режим жидкой стали, снижая температуру стального кожуха ковша и снижая окружные напряжения сжатия на горячей поверхности рабочего слоя футеровки. Установлено, что частично замена арматурного слоя футеровки теплоизоляцией практически более целесообразна благодаря возможности сохранить или увеличить вместимость сталеразливочного ковша [102].

В работах [51 – 53, 103] с целью исследования применения электронагрева футеровок создана математическая модель для определения снижения температуры жидкой стали с момента выпуска до установки ковша на стенд агрегата ковш-печь.

В целом необходимо отметить, что учеными разработано достаточно много различных математических моделей [4, 51, 89, 97 – 99, 104 – 108], связанных с тепловой работой стендов и футеровок ковшей. Многие из них отличаются локальностью решаемых задач, например, позволяют определять только температурные поля в футеровке без расчета теплового баланса стенда. Наиболее близка для решения задач данной диссертации математическая модель, представленная в работах [19, 101] однако она требует модификации для возможности расчета процессов обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых футеровок и определения теплового баланса стендов, оборудованных водоохлаждаемыми горелками.

### **1.5 Выводы и постановка задач исследования**

Проведенные обзор, критический анализ и систематизация сведений, представленных в специальной технической литературе показывают, что затраты на огнеупоры, применяемые в футеровке сталеразливочных ковшей весьма высоки и составляют от 30 до 60 % от затрат всего сталеплавильного комплекса на огнеупоры основного состава. Для футеровки рабочего слоя в сталеразливочных ковшах широко используют углеродсодержащие периклазоуглеродистые и алюмопериклазоуглеродистые безобжиговые смолосвязанные огнеупоры. Одним из основных недостатков таких огнеупоров является обезуглероживание при первом разогреве на стенде. Долгое время борьбе с этим явлением не уделяли должного внимания, поскольку в ряде случаев подвергали сомнению сам факт его существования, а величину обезуглероженного слоя огнеупора считали гораздо меньшей, чем она есть на практике. Однако расширение области применения углеродсодержащих огнеупоров, накопление практического опыта их эксплуатации показали, что явление обезуглероживания огнеупоров однозначно отрицательно сказывается на стойкости футеровки, а глубина обезуглероженного слоя,

образовавшаяся после первого разогрева, достигает значительных величин. При повсеместно используемом высокотемпературном (до 1100 – 1200 °С) разогреве углеродсодержащих футеровок на газовых стендах глубина обезуглероженного слоя может достигать 8 – 10 мм. Это явление является причиной снижения стойкости футеровки на 5 – 10 плавов, загрязнения расплава стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения, повышенного расхода огнеупоров на тонну стали, не позволяет использовать ресурсы по повышению емкости ковша за счет уменьшения толщины рабочего слоя футеровки. Кинетика обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров массового производства и применения мало изучена. Фактически отсутствуют данные о влиянии температурно-временного фактора и состава огнеупоров на их обезуглероживание. Это сдерживает развитие и прогресс в разработке малообезуглероживающих технологий разогрева ковшевых футеровок. Применение ресурсосберегающих малообезуглероживающих температурных режимов разогрева, реализуемых на стендах, является одним из способов снижения обезуглероживания огнеупоров, повышения стойкости футеровок и качества стали. Разработка таких режимов и теплотехнологий возможна при наличии глубоких теоретических знаний и эмпирических данных о совокупности и взаимной связи тепломассообменных и физико-химических процессов протекающих при тепловой обработке углеродсодержащих футеровок на стендах. Множество публикаций в специальной технической литературе свидетельствует о широком применении для исследования комплекса таких процессов с помощью математических моделей. Однако математические модели позволяющие прогнозировать глубину обезуглероженного слоя углеродсодержащих огнеупоров в зависимости от температурного режима разогрева исчисляются единицами и имеют множество функциональных ограничений.

В результате проведенного литературного обзора можно констатировать, что ресурсосбережение при производстве стали на основе сокращения удельных расходов ковшевых огнеупоров на тонну стали и применения малообезуглероживающих режимов разогрева углеродсодержащих футеровок на газовых стендах, обеспечивающих экономию природного газа является актуальной научно-



практической задачей, имеющей отраслевое значение, обеспечивает снижение себестоимости и повышение качества стали.

На основании вышеизложенного в рамках настоящей диссертации определены следующие задачи исследования:

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1) Разработать многофакторную детерминированную математическую модель тепловой работы газового стенда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой (в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение), и тепло-массообменных процессов, протекающих при высокотемпературном разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей.

2) Исследовать кинетику высокотемпературного окисления алюмопериклазоуглеродистых и периклазоуглеродистых огнеупоров марок APC-75H1, AMC 78-8/7HG и RI-MC175LC, MayCarb284-AX. Установить и научно обосновать закономерности влияния состава различных огнеупоров и температурно-временного фактора на интенсивность окислительных процессов.

3) Исследовать свойства, минералогический, фазовый состав и макроструктуру обезуглероженных слоев алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров, научно обосновать их влияние на качество стали по экзогенным неметаллическим включениям футеровочного происхождения.

4) Исследовать влияние различных факторов на тепловую эффективность стендов, разработать малообезуглероживающие ресурсосберегающие режимы разогрева сталеразливочных ковшей, обеспечивающие повышение стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок и металлургическое качество стали.

5) Апробировать и внедрить результаты теоретических и экспериментальных исследований в производство и учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия», 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».



## 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

### 2.1 Обоснование выбора огнеупорных материалов для исследования процессов высокотемпературного обезуглероживания

Наибольший практический интерес представляет установление зависимостей и закономерностей обезуглероживания безобжиговых смолосвязанных углеродсодержащих огнеупоров массового промышленного производства, широко применяемых при футеровке ковшей. В специальной технической литературе достаточно много информации об исследованиях различных лабораторных экспериментальных составах, содержащих различные формы и виды графита, комбинации антиоксидантов, нанодобавки и другие особенности [31 – 36]. Однако данные по высокотемпературному обезуглероживанию таких составов в большинстве случаев редко применимы для огнеупоров массового производства. В связи с этим для исследований выбраны широко распространенные периклазоуглеродистые и алюмопериклазоуглеродистые ковшевые огнеупоры марок APC-75H1 (ООО «Группа Магнезит» (Dalmond)), AMC 78-8/7HG, RI-MC175LC (фирма RI); MayCarb 284-AX (фирма MAYERTON). Химический состав исследуемых огнеупоров представлен в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав исследуемых ковшевых огнеупоров

Химический элемент*	Содержание, % (по массе), химического элемента в огнеупоре марки (место применения в ковше)			
	APC-75H1 (стены)	AMC 78-8/7HG (стены)	RI-MC175LC (шлаковый пояс)	MayCarb 284-AX (шлаковый пояс)
MgO	10,0	11,9	79,0	77,1
SiO <sub>2</sub>	–	5,0	2,0	3,1
CaO	–	0,6	1,7	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	2,2	1,5	0,7
C <sub>общ</sub>	7,0	9,7	15,0	15,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75,0	72,1	4,0	2,6
Примечание. * – антиоксиданты в таблице не представлены.				

Алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры марок APC-75H1 и AMC 78-8/7HG содержат в своем составе 7 и 9,7 % углерода, применяются для выполнения рабочего слоя стен футеровок сталеразливочных ковшей. Огнеупоры марок RI-MC175LC и MayCarb 284-AX представляют собой периклазоуглеродистые составы, содержат почти в два раза больше углерода (15 и 15,5 %), обладают более высокой коррозионной стойкостью к шлаковым расплавам и используются для футеровки рабочего слоя шлакового сталеразливочных ковшей.

## **2.2 Применяемое оборудование и методика проведения экспериментальных исследований**

Кинетику обезуглероживания углеродсодержащих огнеупоров исследовали в лабораторных условиях. Для этого из кирпичей промышленного производства вырезали образцы в виде параллелепипедов с размерами в длину 45 – 52 мм, в ширину 21 – 26 мм и в высоту 20 – 26 мм. Нагрев образцов проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха. Образцы нагревали до температур  $t$  900, 1000, 1100, 1200, 1250 °С и выдерживали при постоянной температуре в течение 1, 2 и 3 ч. Температуру образца непрерывно измеряли хромель-алюмелевой термопарой, показания которой фиксировали на приборе «Термодат 19Е2». Массу образцов до и после эксперимента определяли на весах Vibra AF-220CE.

Для установления влияния состава атмосферы провели две серии экспериментов. В первой серии в процессе эксперимента загрузочное окно печи было открыто для свободного доступа атмосферного воздуха. Во второй серии экспериментов образец помещали в трубку из кварцевого стекла, концы которой герметично закрывали пробками. Доступ атмосферного воздуха во внутренне пространство трубки, в котором находился образец, отсутствовал. Количественно интенсивность обезуглероживания огнеупора определяли по глубине  $\delta$  обезуглероженного слоя в изломе образцов и по потере их массы.

В изломе образцов обезуглероженный слой имеет характерный серовато-коричневый цвет. Сердцевина образцов, содержащая углерод, имеет характерный черный цвет, аналогичный цвету образцов до термической обработки. Глубину обезуглероженного слоя в изломе определяли штангельциркулем на середине каждой грани образцов. Полученные данные для четырех граней усредняли.

Количественно интенсивность выгорания углерода так же оценивали с помощью гравиметрического метода по потере массы образцов. Применяли методику, представленную в работе [19]. Удельные потери массы с единицы поверхности образцов определяли по соотношению [19]:

$$\Delta m_y = \frac{\Delta m}{F} = \frac{m_1 - m_2}{F}, \text{ г/см}^2 \quad (2.1)$$

где  $\Delta m$  – потери массы образца в процессе эксперимента, г;  $m_1$  и  $m_2$  – масса образца до и после эксперимента, г;  $F$  – площадь поверхности образца,  $\text{см}^2$ .

В общем случае потери массы образцов состоят из потерь  $\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$  вследствие удаления в атмосферу влаги,  $\Delta m_{\text{л}}$  летучих и  $\Delta m_{\text{с}}$  выгоревшего углерода, повышению массы образца на величину  $\Delta m_{\text{а}}$  за счет присоединения кислорода способствует окисление антиоксидантов, например, алюминия, соответственно [19]:

$$\Delta m = \Delta m_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta m_{\text{л}} + \Delta m_{\text{с}} - \Delta m_{\text{а}}. \quad (2.2)$$

Поскольку в экспериментах использовали смолосвязанные огнеупоры с одинаковой влажностью, а температуры нагрева превышали температуры удаления химически связанной влаги и летучих принимали, что для исследуемых огнеупоров

$$\Delta m_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta m_{\text{л}} = \text{const}. \quad (2.3)$$

При обработке полученных в результате экспериментов данных принимали, что процесс обезуглероживания подчиняется диффузионному механизму, за-

висимость глубины обезуглероженного слоя от времени  $\tau$  соответствует закону квадратного корня. В таких условиях константа  $k'$  скорости обезуглероживания соответствует уравнению Аррениуса [109].

$$k' = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (2.4)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от химического состава огнеупора, состава атмосферы и других факторов,  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}^{0.5})$ , К;  $T$  – температура, К.

Графическая зависимость  $\ln k = f(1/T)$ , в логарифмических координатах имеет вид прямой линии.

Таким образом, потери массы вследствие обезуглероживания можно описать зависимостью [19]:

$$\Delta m = k' \sqrt{\tau}, \quad (2.5)$$

где  $k'$  – константа скорости обезуглероживания,  $\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}^{0.5})$ ;  $\tau$  – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

В общем виде, на основе соотношений (2.4) и (2.5) потери массы от температуры и времени выдержки при постоянной температуре можно представить в следующем виде:

$$\Delta m = A \exp(-B/T) \sqrt{\tau}. \quad (2.6)$$

Термогравиметрический анализ образцов огнеупоров выполняли в Центре коллективного пользования «Материаловедение» Сибирского государственного индустриального университета на дериватографе LABSYS evo TG DTA DSC 1600 при нагреве до 1100 °С со скоростью 15 °С/мин. Фазовый состав огнеупоров определяли с применением рентгеновского дифрактометра XRD-6000.

После термической обработки определяли водопоглощение образцов. Для этого предварительно высушенный в сушильном шкафу образец взвешивали на технических весах с точностью до 0,1 г, т.е. определяли массу сухого образца ( $m_{c.o}$ ). Взвешенный образец помещали на 15 мин в нагретую муфельную печь. Нагретый образец медленно погружали в сосуд с водой и выдерживали его в течение 30 мин. После извлекали огнеупор из воды, удаляли влагу с поверхности фильтровальной бумагой и взвешивали, тем самым определяли массу влажного образца ( $m_{B.o}$ ). Далее рассчитали массу воды, поглощенной огнеупором:

$$m_B = m_{B.o} - m_{c.o}. \quad (2.7)$$

Водопоглощение  $W'$  определяли как отношение массы воды, поглощенной образцом, к его массе в сухом состоянии, выраженное в процентах:

$$W' = m_B / m_{c.o} \cdot 100 \%. \quad (2.8)$$

Дополнительно определяли водопоглощение  $W$  образцов с единицы площади поверхности по соотношению:

$$W = (m_{B.o} - m_{c.o}) / F, \text{ г/м}^2, \quad (2.9)$$

где  $m_{c.o}$  и  $m_{B.o}$  – масса высушенного в сушиле образца и образца после выдержки в емкости с водой, г;  $F$  – площадь обезуглероженной поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Водопоглощение в данном случае определяли как косвенную характеристику пористости образцов в целях установления влияния на нее обезуглероживания огнеупоров.

Исследования макро-, микроструктуры, минералогического и фазового составов обезуглероженных слоев образцов огнеупоров проводили при увеличении 10 – 30<sup>×</sup> на стереомикроскопах ЛабоСтеми-4 зум, Микромед МС-5-ZOOM LED и при 20000 – 30000<sup>×</sup> на сканирующем электронном микроскопе КУКУ-ЕМ 6900. Подготовленные аншлифы в отраженном свете исследовали при увеличении 50 – 400<sup>×</sup> на микроскопе ЛабоПол-2 РПО.

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ КОВШЕВЫХ ОГНЕУПОРОВ**

В главе представлены результаты лабораторных исследований кинетики высокотемпературного обезуглероживания безобжиговых смолосвязанных углеродсодержащих ковшевых огнеупоров массового производства. С помощью гравиметрического метода установлены зависимости влияния температуры и времени выдержки при постоянной температуре в атмосфере воздуха на глубину обезуглероженного слоя огнеупора. Исследованы минералогический, фазовый состав и макроструктуру обезуглероженных слоев алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров проведена косвенная оценка их пористости. Результаты исследований опубликованы в работах [110 – 116].

#### **3.1 Исследование кинетики высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров марки APC-75H1**

На рис. 3.1 представлен внешний вид изломов ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75H1 после высокотемпературной термической обработки в атмосфере воздуха в электрической печи сопротивления. Из рис. 3.1 видно, что поверхностные обезуглероженные слои имеют характерный серовато-коричневый цвет. Необезуглероженная сердцевина имеет черный цвет. При этом между обезуглероженными и необезуглероженными слоями огнеупора присутствует достаточно четкая граница. Выраженная переходная зона крайне мала и достигает фактически доли мм. По результатам анализа обезуглероженного слоя огнеупора на остаточный углерод установлено, что его значение находится в интервале 0,1 – 0,3 %.

На рис. 3.2 представлена зависимость глубины  $\delta$  обезуглероженного слоя от температуры  $t$  и времени  $\tau$  выдержки в атмосфере воздуха, построенная по результатам экспериментальных данных. Из рис. 3.2 видно, что увеличение

температуры от 800 до 1200 °С и времени выдержки от 60 до 180 мин приводит к росту глубины обезуглероженного слоя с 2 до 5 мм.



Рисунок 3.1 – Внешний вид алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров после тепловой обработки (горизонтальные ряды слева на право время выдержки 1, 2 и 3 ч, вертикальные ряды сверху вниз температура выдержки 900, 1000, 1100, 1200, 1250 °С)

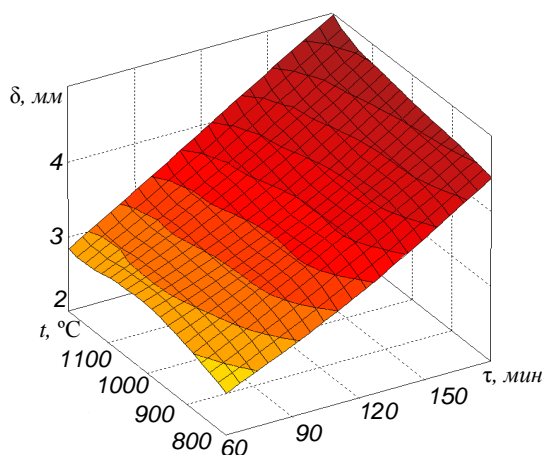


Рисунок 3.2 – Зависимость глубины обезуглероженного слоя от температуры и времени выдержки

Повышение температуры интенсифицирует обезуглероживание алюмопериклазоуглеродистого огнеупора марки APC-75H1 в меньшей степени, чем пе-

риклазоуглеродистых огнеупоров, исследованных в работах [19, 20, 21]. Этот факт связан с непрерывным расширением алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров ввиду образования шпинели на рабочей поверхности там, где температура достаточна для реакции. В связи с этим, как было отмечено выше, огнеупор уплотняется [29], что препятствует проникновению кислорода в его внутренние слои и соответственно выгоранию углерода.

В результате статистической обработки экспериментальных данных для осуществления прогнозных расчетов получена зависимость, связывающая потери массы  $\Delta m$  образца и глубину обезуглероженного слоя (рис. 3.3). На рис. 3.3 представлены аналогичные зависимости для перклазоуглеродистых огнеупоров RI-MC11LC, DALCAR P8L20, DALCAR P15M7 полученные в работах [19 – 21].

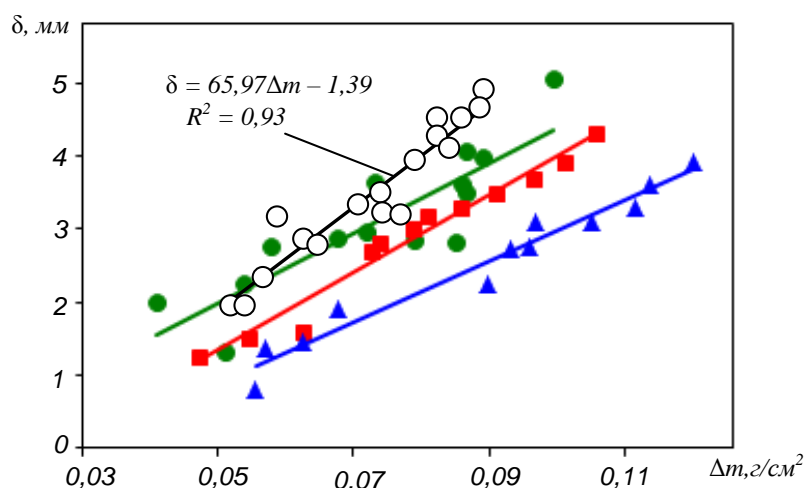


Рисунок 3.3 – Зависимость глубины обезуглероженного слоя от потерь массы образцов огнеупоров марок RI-MC11LC (●), DALCAR P8L20 (■), DALCAR P15M7 (▲) [19 – 21] и DALMOND APC-75H1 (○)

Для огнеупоров марок DALCAR P15M7 и DALCAR P8L20 воздействие температуры нагрева на снижение массы не так сильно проявляется, как для огнеупора марки RI MC11LC. Это объясняется наличием в структуре огнеупоров определенных антиоксидантов. Так у огнеупора марки RI-MC11LC интенсивное снижение массы происходит при температурах более 1100 °С. Это вызвано тем, что в его составе нет антиоксидантов, которые препятствуют увеличению скорости окисления углерода. Наибольшее снижение массы в исследуемом интервале



температур выражено у огнеупора марки DALCAR P15M7, несмотря на присутствие в его структуре антиоксидантов. Это вызвано увеличенным содержанием углерода (14 – 16 %) по сравнению с другими огнеупорами, которые были исследованы в рамках настоящей работы. В исследуемом температурном интервале алюминий, используемый в качестве антиоксиданта, оказывает самый большой антиокислительный эффект. Так его наличие в составе огнеупора марки DALMOND APC-75H1 гарантирует последнему меньшую глубину обезуглероженного слоя по сравнению с огнеупорами марок DALCAR P15M7, RI-MC11LC и DALCAR P8L20 без алюминия в составе.

При анализе зависимости глубины обезуглероженного слоя от потерь массы необходимо учитывать некоторую субъективность при определении величины интенсивности выгорания углерода огнеупора с помощью визуальной оценки глубины обезуглероженного слоя. Это связано с тем, что серый (черный) цвет углеродсодержащего (графитсодержащего) слоя одинаков при содержании углерода как 5, так и 15 % (т.е. в 3 раза большем), но появление обезуглероженного (желто-коричневого) слоя толщиной 1 мм, при выгорании 5 % углерода приводит к меньшему снижению массы, чем при обезуглероживании 1 мм слоя, содержащего 15 % углерода. Также изменение массы огнеупора при их окислении обусловлено присутствием разнообразных антиоксидантов. При оценке стойкости огнеупора при его эксплуатации наибольшее практическое значение имеет значение глубины обезуглероженного слоя огнеупора, а не снижение его массы при увеличении температуры (нагреве), т.к. обезуглероженный слой фактически полностью разрушается при первых наливах расплава металла из-за низкой прочности и коррозионной стойкости. Поэтому степень износа футеровки за плавку возможно определить, зная глубину обезуглероженного слоя.

Для прогнозных расчетов получена зависимость, позволяющая определить толщину обезуглероженного слоя огнеупора от температуры и времени нагрева:

$$\delta = 0,5119 \cdot \exp(-494,0/T) \sqrt{\tau}; \quad R^2 = 0,72, \quad (3.1)$$

где  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

Серия экспериментов по нагреву образцов в атмосфере воздуха, содержащей 21 % кислорода, показала, что обезуглероживание алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки DALMOND APC-75H1 происходит достаточно интенсивно. Прогнозные расчеты с применением соотношения (3.1) показывают, что, в зависимости от режима разогрева, в промышленных условиях огнеупор может обезуглероживаться на глубину до 7 – 10 мм.

Серия экспериментов, в которой образцы нагревали в бескислородной атмосфере, показала, что в таких условиях, несмотря на продолжительные выдержки и высокие температуры нагрева, обезуглероживания образцов не происходит. Характерно, что потери массы образцов составили от 0,9 до 1,1 %, это почти на порядок меньше, чем при нагреве в атмосфере воздуха, при этом потери с влагой составляют всего 0,1 % от первоначальной массы огнеупора. Таким образом, разогрев футеровки в безокислительной атмосфере является эффективным способом предотвращения обезуглероживания поверхностного слоя алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров.

На рис. 3.4 представлены результаты дифференциально-термического анализа молотого алюмопериклазоуглеродистого огнеупора APC-75H1.

В молотом алюмопериклазоуглеродистом огнеупоре при нагреве до 100 – 200 °С происходят эндотермические процессы дегидратации и удаления летучих, до 300 – 650 °С – экзотермические процессы окисления летучих, антиоксидантов (порошка металлического алюминия) и коксования связующего, свыше 650 – 700 °С – окисление антиоксидантов, углерода, содержащегося в графите и коксовом остатке. Масса  $\Delta m$  навески при температурах более 700 °С значительно уменьшается.

Наибольшая интенсивность обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистого огнеупора исследуемой марки в атмосфере воздуха происходит при температурах свыше 650 – 700 °С.

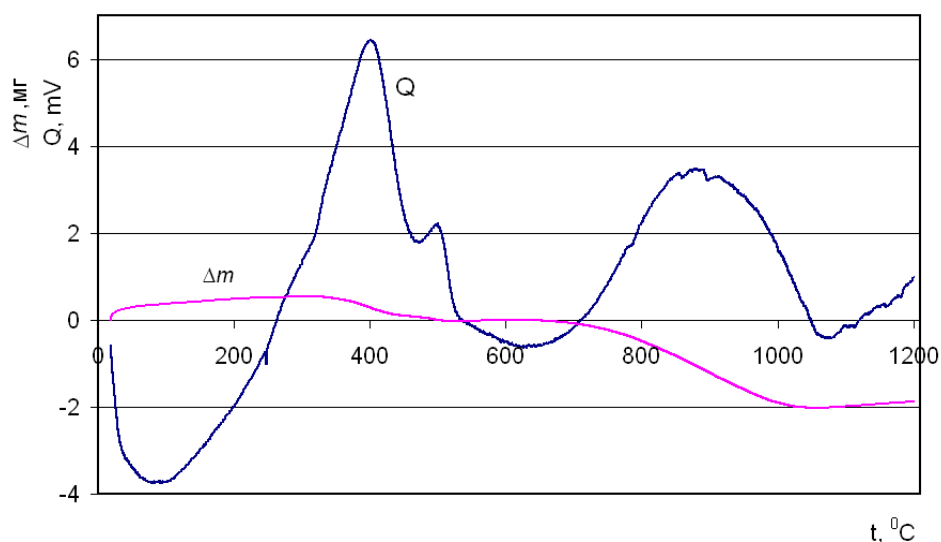


Рисунок 3.4 – Результаты дифференциально-термического анализа  
алюмопериклазоуглеродистого огнеупора APC-75N1

### 3.2 Исследование минералогического и фазового составов обезуглероженных слоев ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75N1

Макроструктура обезуглероженных слоев огнеупора представлена на рис. 3.5.



Рисунок – 3.5 Макроструктура обезуглероженных слоев огнеупора  
(увеличение  $\times 6$ )

Исследование образцов на стереомикроскопе выявило, что минеральный состав огнеупора следующий: корунд, графит, кремнезем и небольшое количество шпинели в корунде [113, 114]. Минералогические исследования выполнены при участии Н.И. Кувшинниковой.

Основная масса образцов имеет серо-черный цвет. Текстура огнеупора однородная, плотная. Огнеупоры обладают высокой пористостью. Большая часть (до 20 %) пор представлена закрытыми изометрично-сферическими порами размером от субмикроскопических до 1,5 мм, равномерно распределенных в объеме огнеупора. Однако на открытой рабочей поверхности огнеупора присутствуют открытые поры, связанные между собой сквозными каналами.

Графит представлен мелкочешуйчатыми индивидами. Размеры отдельных индивидов колеблются в пределах от 0,05 до 1 – 2 мм по простиранию чешуек. Благодаря высокой пластичности графитовой массы, она обтекает кристаллы и обломочные скопления корунда. Корунд образует изометрично-зернистые кристаллы. Изучение аншлифов в отраженном свете (рис. 3.6 – 3.12) выявило, что в графите присутствуют кристаллы корунда (рис. 3.6 – 3.8). Они имеют трещиноватую структуру (рис. 3.9). Также кристаллы корунда имеют включения шпинели.

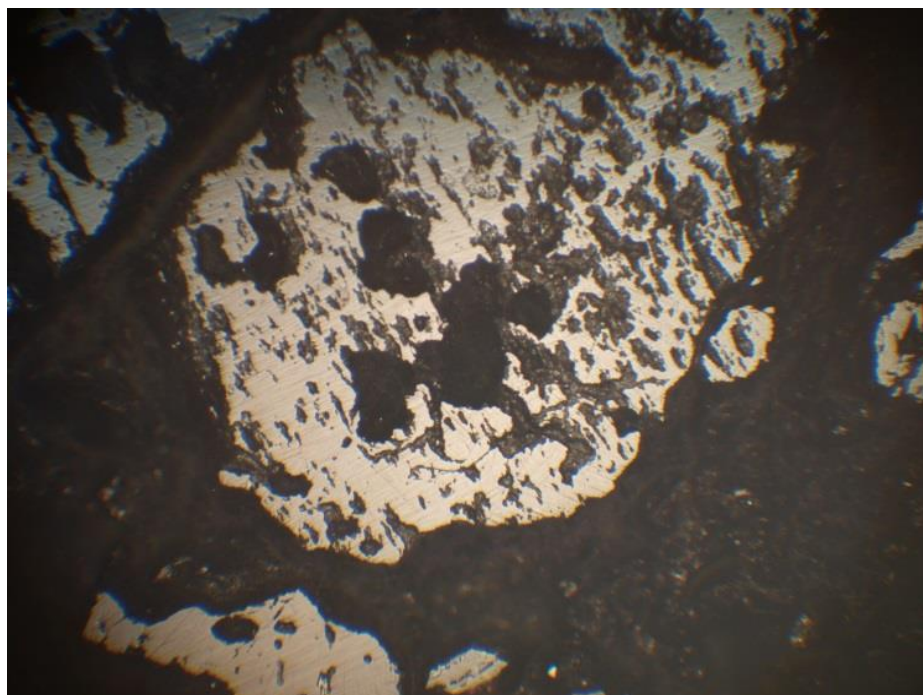


Рисунок 3.6 – Кристаллы корунда (увеличение  $\times 200$ )

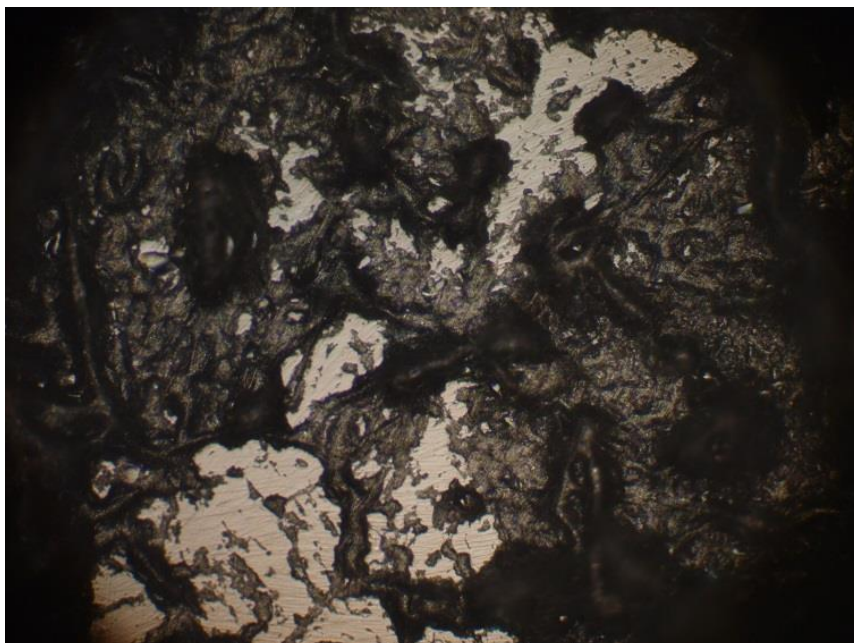


Рисунок 3.7 – Корунд в графите (увеличение  $\times 100$ )

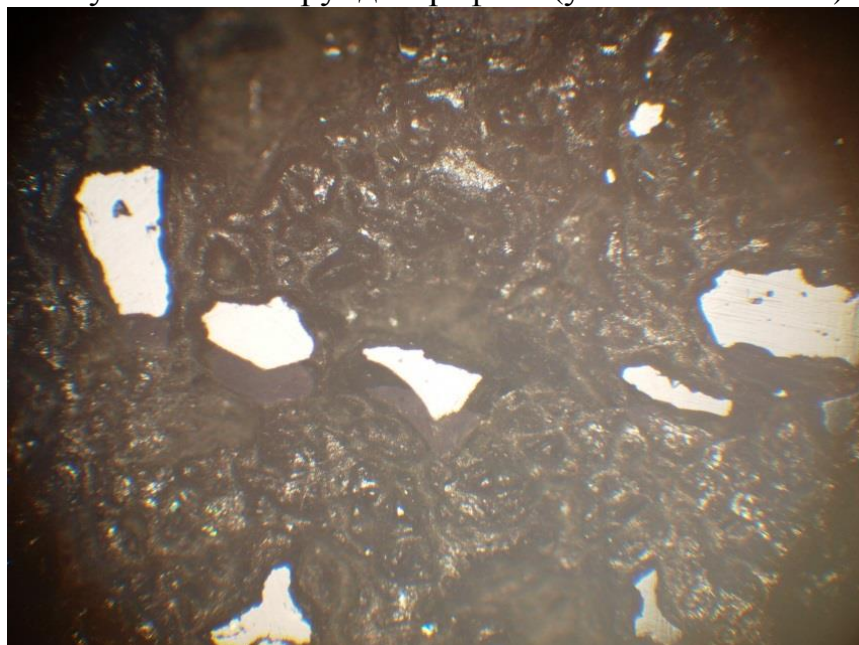


Рисунок 3.8 – Изометрично-зернистые кристаллы корунда в графите  
(увеличение  $\times 200$ )

Высокая пористость обезуглероженных слоев огнеупора, сформированная вследствие выгорания (окисления) углеродного каркаса свидетельствует об их предрасположенности к пропитке металлом и шлаком и разрушению по механизму, описанному выше.

Кристаллы корунда (рис. 3.10) в графите в представленном образце обладают высокой пористостью.



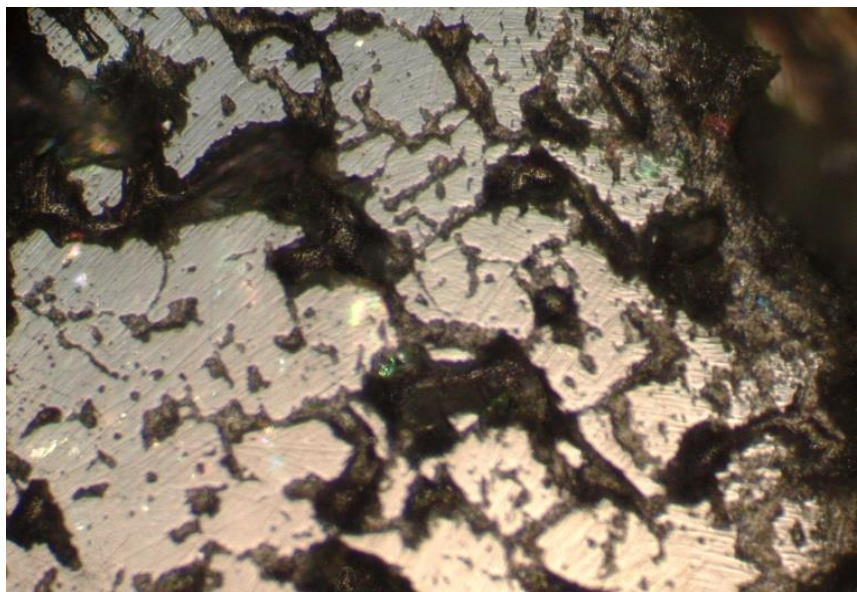
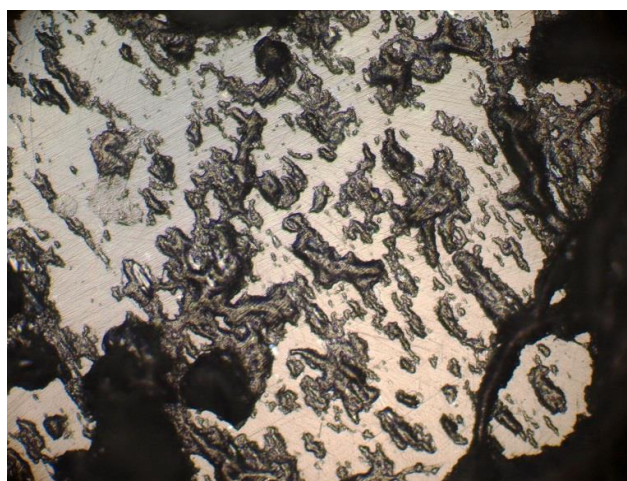
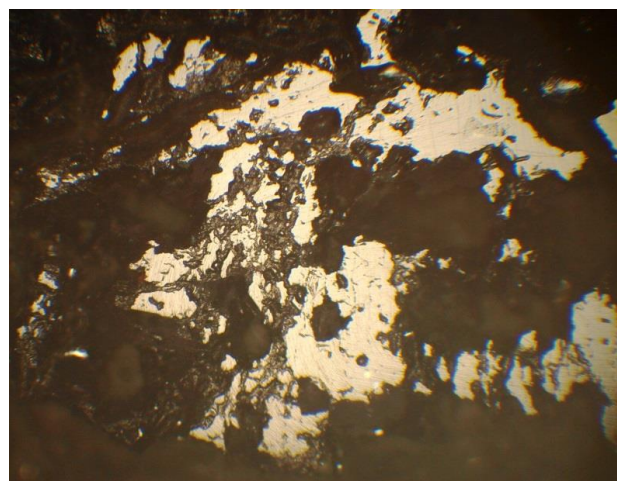


Рисунок 3.9 – Трещиноватая структура корунда (увеличение  $\times 200$ )



*a*



*б*

Рисунок 3.10 – Корунд (увеличение  $\times 200$  (*a*),  $\times 100$  (*б*))

На рис. 3.11 представлены результаты исследований микроструктуры и фазового состава области раздела обезуглероженных и необезуглероженных слоев огнеупора проведенных на сканирующем электронном микроскопе. Характерной особенностью исследуемых огнеупоров является выраженный резкий переход необезуглероженных слоев в обезуглероженные. Граница перехода фиксируется по резкому снижению содержания углерода (рис. 3.11) от исходного состояния до фактически следов. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтверждают визуальное определение обезуглероженных слоев по характерному серовато-коричневому цвету, необезуглероженные слои имеют черный цвет.

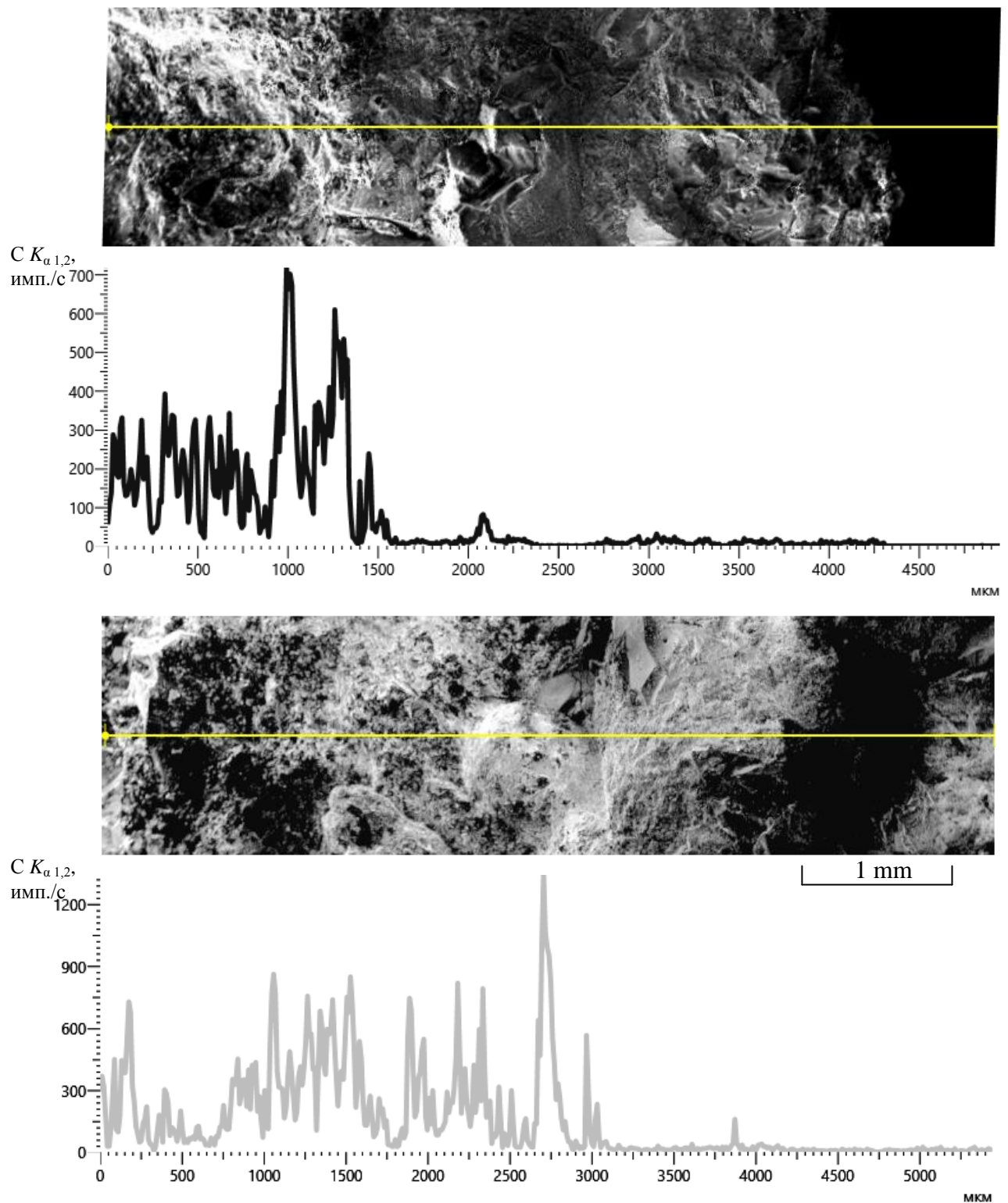


Рисунок 3.11 – Характерные микроструктура и распределение углерода в области раздела обезуглероженных и необезуглероженных слоев огнеупора

### 3.3 Исследование водопоглощения и анализ изменения макроструктуры ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75Н1 при термической обработке

Результаты исследований водопоглощения как косвенной характеристики пористости огнеупоров представлены на рис. 3.12, из которого видно, что увеличение температуры и времени тепловой обработки в целом приводит к увеличению водопоглощения. Характерно, что для исходных (не подвергнутых тепловой обработке) образцов значения  $W$  составили всего  $28 \text{ г/м}^2$ , т.е. на порядок меньше, чем у образцов прошедших тепловую обработку. Для образцов нагретых до  $1000^\circ\text{C}$  и выдержанных в течение 120 мин в бескислородной атмосфере водопоглощение составляет  $466 \text{ г/м}^2$  т.е. всего на 10,5 % меньше чем у образцов, прошедших аналогичную тепловую обработку в атмосфере воздуха.

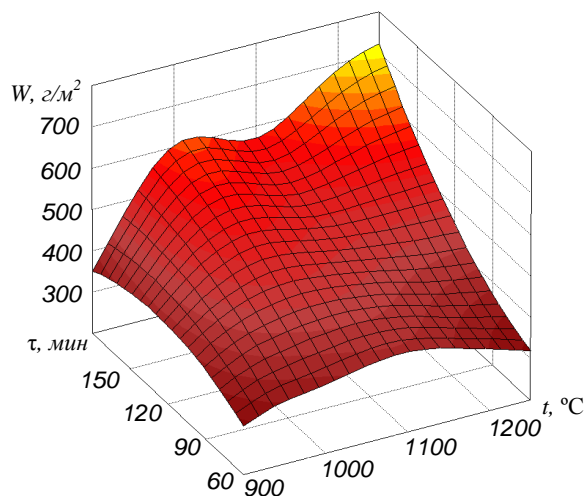


Рисунок 3.12 – Зависимость водопоглощения образцов огнеупора при различных режимах тепловой обработки

В общем случае при тепловой обработке алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров водопоглощение, а соответственно и пористость зависят от множества факторов, однако основными процессами, влияющими на них, являются:

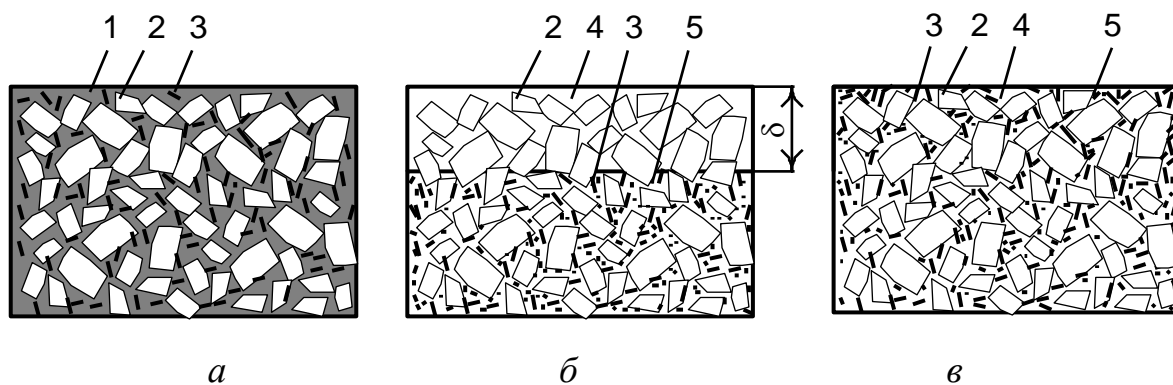
1. Деструкция связующего, придающего до тепловой обработки практически монолитную макроструктуру смолосвязанным огнеупорам. Связующее за-



полняет все поры между зернами ( $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) огнеупорного материала и чешуйчатого графита (рис. 3.13, *а*). Это обеспечивает огнеупору крайне низкое водопоглощение в исходном состоянии. При тепловой обработке происходит деструкция (термическое разложение) связующего, сопровождающаяся испарением летучих веществ и образованием углеродных (сажистых) частиц. С одной стороны деструкция связующего приводит к увеличению пористости и водопоглощения, с другой образование сажистых частиц способствует заполнению образовавшихся пор и некоторому снижению пористости (водопоглощения).

2. Шпинелеобразование, сопровождающееся расширением и уплотнением огнеупора. Степень развития этого процесса зависит от состава огнеупора и температурно-временного режима тепловой обработки.

3. Обезуглероживание, включающее выгорание чешуйчатого графита, имеющегося в исходном составе огнеупора, а также выгорание углеродистых (сажистых) частиц образовавшихся в результате термического разложения связующего.



1 – связующее (смола и т.п.); 2 – зерна  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 – чешуйчатый графит;  
4 – поры, образовавшиеся в результате выгорания связующего и чешуйчатого графита; 5 – углеродистые частицы, образовавшиеся в результате термического разложения связующего

Рисунок 3.13 – Схематичное изображение макроструктуры смолосвязанных огнеупоров в исходном состоянии и после тепловой обработки

Роль состава атмосферы схематично проиллюстрирована на рис. 3.13 б, в. При нагреве в кислородсодержащей атмосфере после тепловой обработки происходит образование обезуглероженного слоя глубиной  $\delta$ , он имеет характерный

светлый цвет, в нем отсутствуют чешуйчатый графит и углеродистые частицы. Этот слой имеет максимальную пористость и водопоглощение. Однако процессы шпинелеобразования способствуют снижению последних.

При тепловой обработке в бескислородной среде образование обезуглероженного слоя не происходит. В изломе образцы по всему сечению имеют темный (черный) цвет, содержат чешуйчатый графит и сажистые частицы. Однако, пористость и водопоглощение, обусловленные разложением исходного связующего, хотя и меньше, чем у огнеупора, прошедшего тепловую обработку в окислительной атмосфере, но остаются на достаточно высоком уровне и процесс шпинелеобразования не компенсирует их в полном объеме.

С точки зрения эксплуатационной стойкости алюмопериклазоуглеродистых смолосвязанных огнеупоров важное значение имеет не только пористость, но и наличие чешуйчатого графита и углеродных частиц в поверхностных слоях, поскольку они снижают смачиваемость поверхности огнеупора металлом и шлаком, а также равномерность теплофизических и механических свойств огнеупора по сечению. Различие составов обезуглероженного и основного слоя огнеупора может привести к возникновению трещин и сколов, вызванных термическими напряжениями при нагреве и охлаждении футеровки.

### **3.4 Термогравиметрический анализ процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров**

Для установления температурных интервалов интенсификации обезуглероживания промышленных периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых безобжиговых смолосвязанных огнеупоров различных составов марок АМС 78-8/7НГ, RI-MC175LC (фирма RI); MayCarb 284-AX (фирма MAYERTON) проведен термогравиметрический анализ. Исследуемые образцы огнеупоров отличались значительной неоднородностью (рис. 3.14) с крупными включениями (до 2 мм) периклаза желтого цвета, белыми включениями в темно-серой однородной массе связующего вещества, поэтому для получения достаточно корректной информации от каждого образца отбиралось для анализа две пробы.



Рисунок 3.14 – Макроструктура образцов огнеупоров марки RI-MC175LC

Рентгенофазовый анализ (рис. 3.15) показал присутствие в образцах антиоксидантов алюминия, карбида кремния.

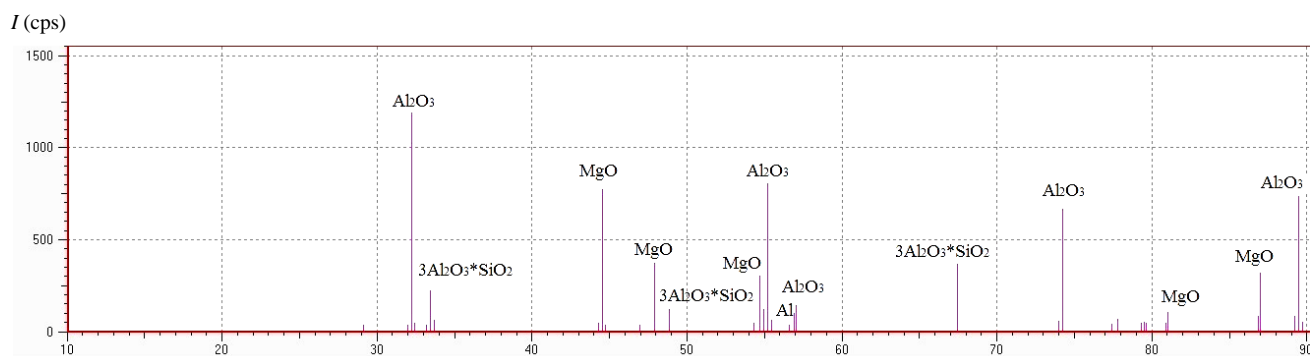
Результаты термогравиметрического анализа представлены на дериватограммах: рис. 3.16 – нагрев в атмосфере кислорода; рис. 3.17 – нагрев в атмосфере воздуха. Во всех случаях на дериватограммах проявляются три экзотермических эффекта *A*, *B*, *C*.

На начальной стадии нагревания (в интервале температур 150 – 600 °С) наблюдается достаточно мощный экзотермический эффект *A* сопровождающийся увеличением массы анализируемого вещества на 2 – 3 %. Этот эффект можно объяснить окислением присутствующего в образцах порошкообразного алюминия по следующей реакции:

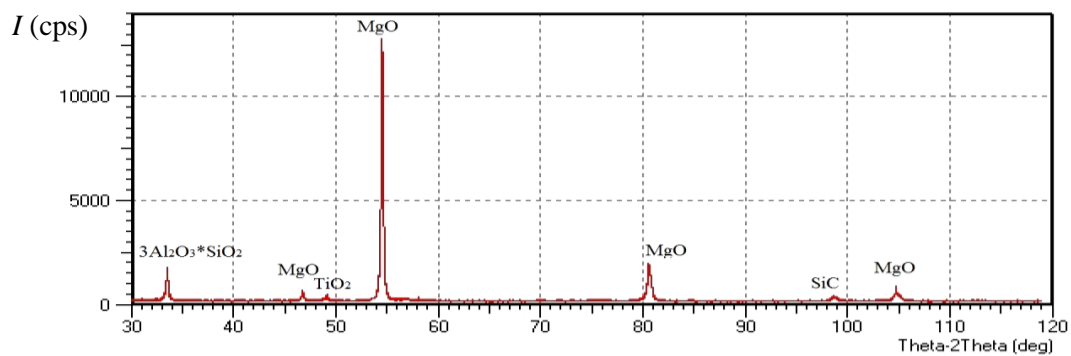


При нагревании в атмосфере кислорода (рис. 3.16) количество прореагировавшего алюминия в соответствии с материальным балансом реакции (3.2) на 30 мг анализируемого вещества, определенное по изменению массы вещества (за счет прихода кислорода), должно составить

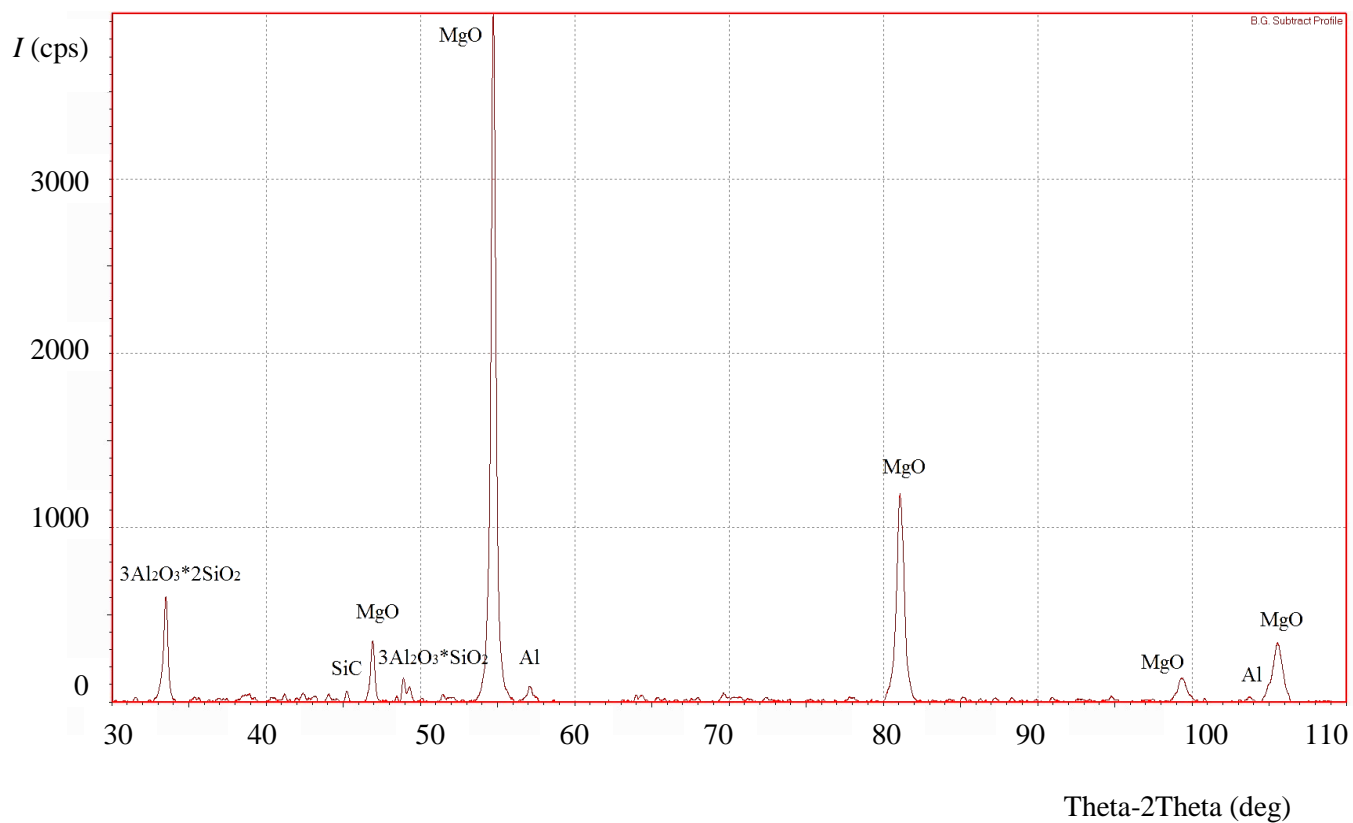
$$\frac{30 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 27}{1,5 \cdot 16} = 1,35 \text{ мг (4,5 \% (по массе)).}$$



*a*



*b*



*c*

Рисунок 3.15 – Результаты рентгенофазового анализа огнеупоров марок  
AMC 78-8/7HG (*a*), RI-MC175LC (*b*), MayCarb 284-AX (*c*)

Тепловой эффект может быть представлен площадью, ограниченной кривой  $A$ , представленной изменением энтальпии, выраженной в милливольты шкалы дериватографа, и ноль кривой, скорректированной в соответствии с изменением массы образца. Конечное (нулевое) значение энтальпийной кривой соответствует точке пересечения ее продолжения с ноль-кривой ( $A'$ ) при температуре примерно  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  для кривых 1 и 2 (АМС 78-8/7НГ) или  $A''$  при температуре примерно  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  для кривых 3 – 6.

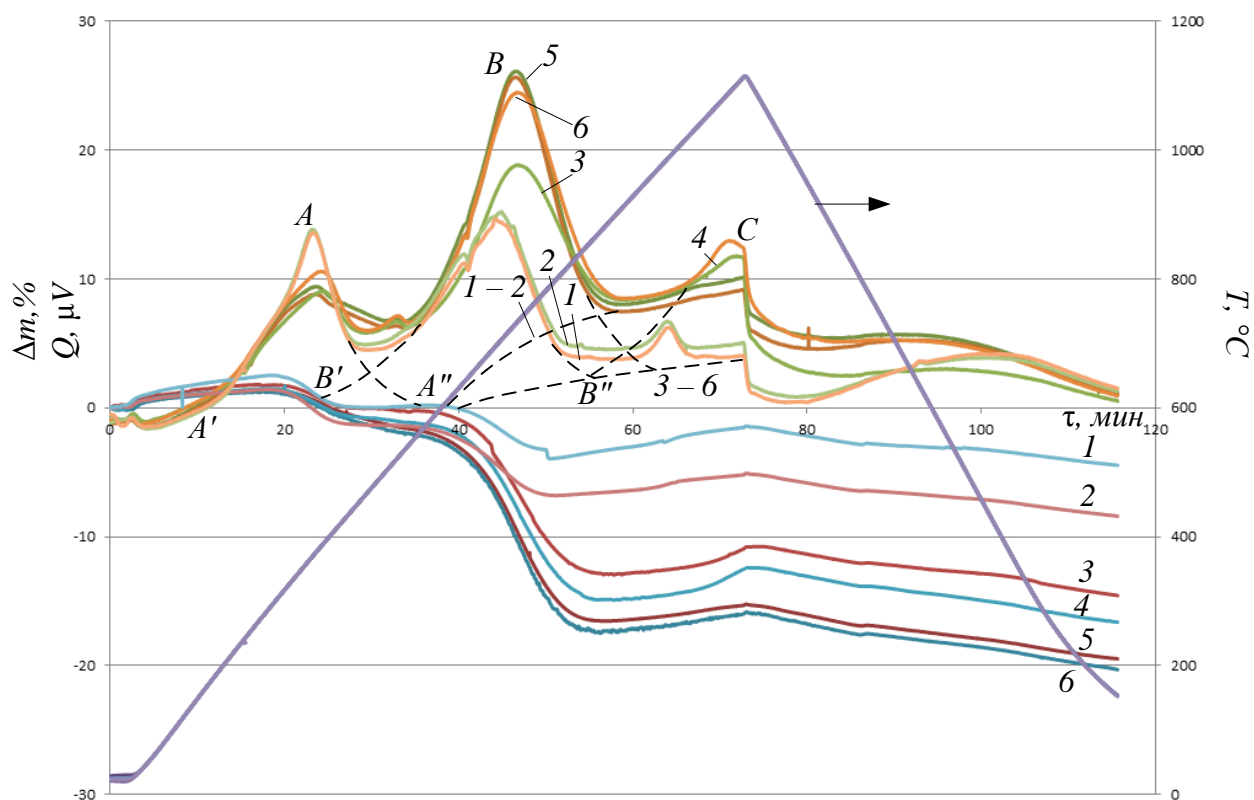


Рисунок 3.16 – Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров в атмосфере кислорода: здесь и на рис. 3.17 1 и 2 – огнеупор марки АМС 78-8/7НГ (образец 1 и 2); 3 и 6 – огнеупор марки MayCarb 284-AX (образец 1 и 2); 4 и 5 – огнеупор марки RI-MC175LC (образец 1 и 2)

Подинтегральная площадь теплового эффекта для кривых 1 и 2 составляет 727 весовых (тепловых) единиц, то есть тепловой эффект во всех случаях практически одинаковый по величине, но для кривых 3 – 6 растянутый по времени и

температуре, возможно, за счет изменения крупности алюминиевого порошка или степени его окисленности.

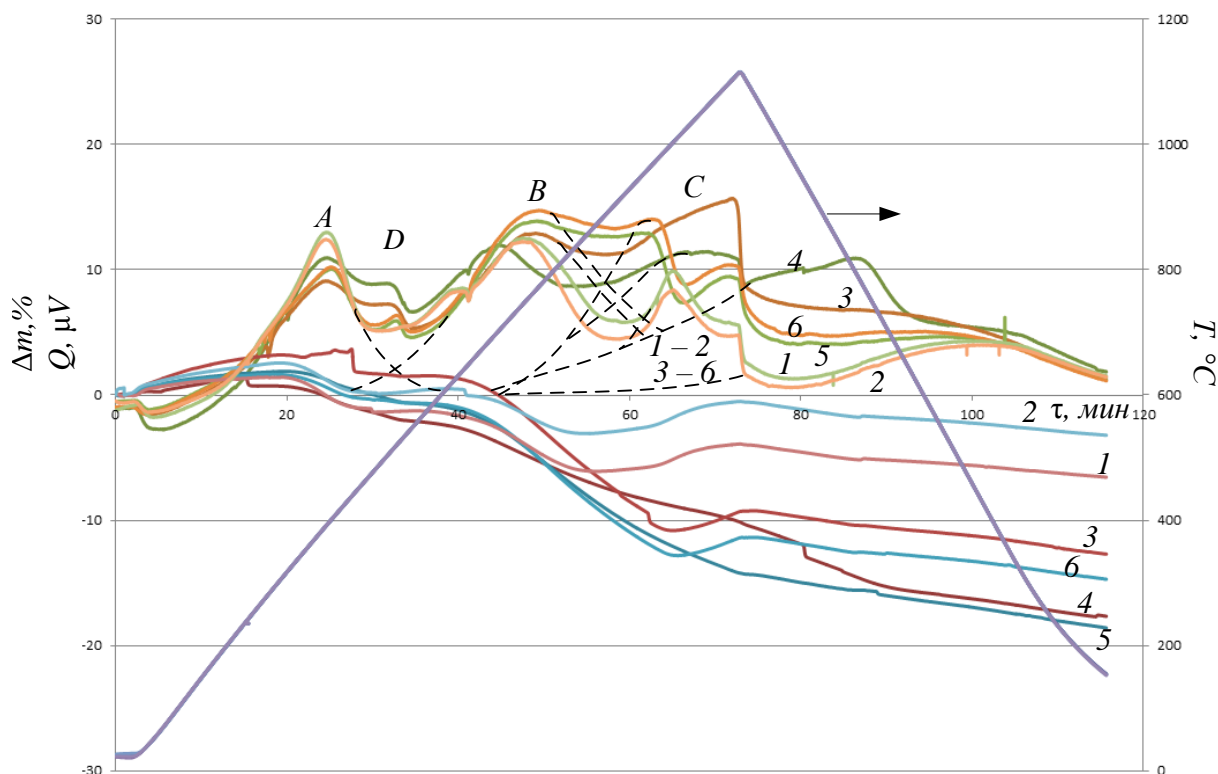
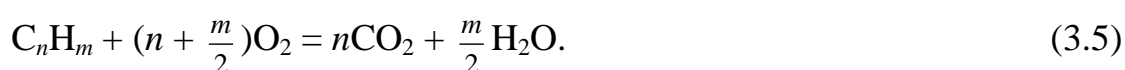


Рисунок 3.17 – Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров в атмосфере воздуха

Следующий (наиболее мощный) экзотермический эффект *B* описывается реакцией окисления углерода скоксованного связующего материала и графита.

В процессе нагревания исследуемых образцов в атмосфере кислорода (рис. 3.16) происходит окисление углерода и частично летучих (часть летучих сгорает после их выделения в газовую фазу вне объема исследуемых образцов). Процесс окисления происходит по реакциям:



В интервале температур 400 – 900 (1000) °С  $B' - B'''' - B''$  (АМС 78-8/7HG 1, 2) или  $B' - B - B''' - \text{RI-MC175LC}$  и MayCarb 284-AX (точки  $B''$  и  $B'''$  лежат на скорректированной за счет уменьшения массы образца ноль-кривой).

Потеря массы от реакций окисления связующего и выделения летучих для образцов 1 и 2 (АМС 78-8/7HG) составляет 4 – 6 %, для образцов 3 – 6 (RI-MC175LC и MayCarb) фактически в три раза больше и составляет 13 – 17 %.

Тепловой эффект от реакций окисления для образцов огнеупоров марки АМС 78-8/7HG составляет по площади  $B' - B'''' - B''$  примерно 876 тепловых единиц, для образца 3 – MayCarb 284-AX примерно 1300 тепловых единиц, для образцов 4 – 6 – примерно 1700 единиц. Максимальное значение  $\Delta H$ , соответственно максимальная скорость окисления во всех случаях наблюдается при температуре 700 °С.

Третий четко выраженный экзотермический эффект  $C$ , протекающий с незначительным увеличением массы исследуемых материалов (1 – 2 %) в интервале температур 900 – 1000 °С относится к реакции окисления карбида кремния:



Приход 1,5 моля  $\text{O}_2 = 48$  г, расход 1 моль  $\text{CO} = 28$  г.

Увеличение массы на 1 моль SiC составляет примерно 20 г. Увеличение массы навески в 30 мг составляет 0,3 – 0,6 мг, что соответствует

$$\frac{(0,3 \div 0,6) \cdot 40}{20} = (0,6 \div 1,2) \text{ мг} = \frac{(0,6 \div 1,2) \cdot 100}{30} = (2 \div 4) \% \text{ (по массе)}$$

окислившегося карбида кремния.

Общая потеря массы исследуемых образцов составляет от 2 – 5 (АМС 78-8/7HG) до 11 – 20 % (RI-MC175LC; MayCarb 284-AX).

При нагревании образцов в среде «воздух» качественная картина термогравиметрического анализа аналогична (рис. 3.18). Также просматривается три экзотермических эффекта от окисления алюминия ( $A$ ), углерода ( $B$ ) и карбида кремния ( $C$ ). Поскольку парциальное давление кислорода в газовой фазе значительно ниже

( $P_{O_2} = 0,21$ ) реакции окисления протекают медленнее и заканчиваются при более высоких температурах. Численные сравнительные характеристики процессов приведены в табл. 3.1 (скорректированные по изменению массы ноль-кривые (0 – 0) для образцов 1, 2 и 3 – 6 обозначены пунктирными линиями).

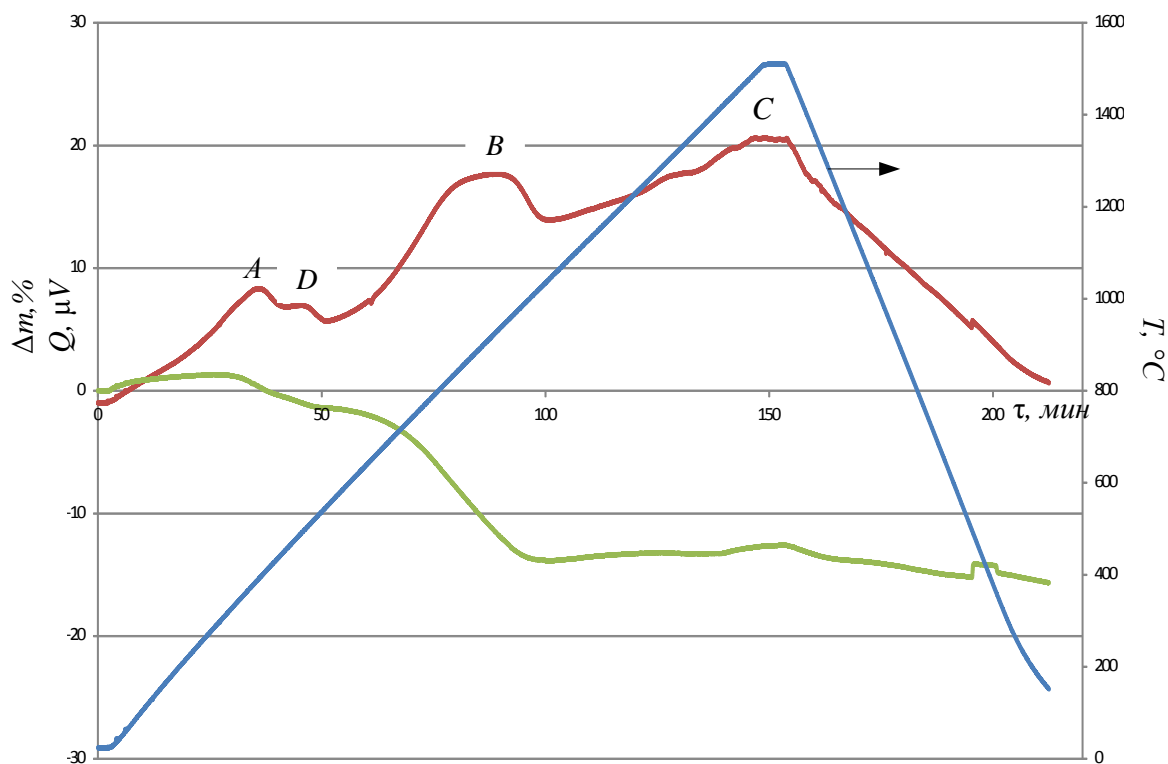


Рисунок 3.18 – Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров в атмосфере воздуха до температуры 1500 °С со скоростью 10 °С/мин

В интервале температур 450 – 600 °С на экзотермический эффект реакции окисления алюминия  $A$  и сопряженный с ним эффект окисления углерода  $B$  практически на всех кривых  $\Delta H = f(t)$  накладывается незначительный по величине  $\Delta H$  эффект частичного окисления летучих  $D$  ( $D'$ ); протекающего практически без изменения массы материала –  $\Delta m$  примерно  $\pm 1$  % (при нагревании в атмосфере кислорода этот эффект в очень малой степени проявился лишь на огнеупоре марки MayCarb 284-AX образце 1). Окисление углерода во всех случаях начинается при температуре 450 – 500 °С, заканчивается при 980 – 1000 °С для



образцов 1 и 2 (АМС 78-8/7HG) и при 960 – 980 °С для образцов 3 – 6 (RI-MC175LC; MayCarb 284-AX), максимальная скорость окисления углерода во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °С.

Окисление карбида кремния (экзотермический эффект С) начинается при 950 – 1050 °С для огнеупора марки АМС 78-8/7HG и 800 – 950 °С для образцов 3 – 6 огнеупоров марки RI-MC175LC и MayCarb 284-AX (при нагревании в атмосфере кислорода соответственно при 900 (1, 2) и 800 – 850 °С). Процесс в соответствии с реакцией (3.6) протекает с незначительным увеличением массы образца (1 – 2 %) и практически завершается при 1100 °С при нагревании в атмосфере кислорода, при нагревании на воздухе корректно судить о завершении процесса можно лишь для образцов 1 и 2 (АМС 78-8/7HG).

Для уточнения интерпретируемых вопросов дополнительно проведен термогравиметрический анализ огнеупора марки RI-MC175LC (образец 3) с нагреванием его на воздухе до температуры 1500 °С со скоростью 10 °С/мин с последующей выдержкой примерно 5 мин и охлаждением до 20 °С (рис. 3.17). На кривой RI-MC175LC (образец 3) достаточно точно дублируются все описанные ранее экзотермические эффекты со сдвигом в сторону более высоких температур вследствие более медленного нагрева (10 °С/мин). Окисление карбида кремния характеризуется мощным экзотермическим эффектом, протекающим в интервале температур 600 – 1100 °С с потерей массы  $\Delta m = 10 \%$ , что говорит о том, что в условиях медленного нагрева преимущественно протекает реакция



с образованием газообразного монооксида кремния SiO.

Таблица 3.1 – Характеристики огнеупоров

Параметры	Кислород, 15 °С/мин						Воздух, 15 °С/мин					
	П1	П2	М1	М2	В1	В2	П1	П2	М1	М2	В1	В2
$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
$\Delta m_{\max}, \%$	8,4	10,5	14,6	21,07	15,9	19,5	6,5	3,2	11,3	12,8	15,0	15,7
$\Delta m_A, \%$	12,4	12,4	9,9	11,2	9,9	9,9	12,4	12,3	10,1	10,1	10,9	9,1
$\Delta m_B, \%$	14,6	14,6	18,69	24,0	25,1	25,7	12,1	12,2	13,8	14,7	11,4	12,4
$\Delta m_C, \%$	4,9	4,0	11,4	12,9	10,8	9,7	5,7	4,7	9,7	10,4	11,2	15,5
$\Delta m_D, \%$	–	–	–	–	–	–	–	–	6,0	5,4	8,9	7,3
$\Sigma H_A, \text{у.ед.}$	727	727	653	685	653	653	844	841	779	757	805	757
$\Sigma H_B, \text{у.ед.}$	876	878	1342	1727	1753	1753	1439	1312	1584	1627	1262	1527
$\Sigma H_C, \text{у.ед.}$	116	75	385	402	349	323	107	65	417	844	1061	1301
$(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})_A, ^\circ\text{C}$	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	194 – 551	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550	173 – 550
$(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})_B, ^\circ\text{C}$	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	408 – 880	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904	418 – 904
$(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})_C, ^\circ\text{C}$	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	900 – 1100	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107	665 – 1107
$t_{\max A}, ^\circ\text{C}$	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398	398
$t_{\max B}, ^\circ\text{C}$	710	710	770	770	770	770	748	748	748	748	748	748
$t_{\max C}, ^\circ\text{C}$	1105	1105	1105	1105	1105	1105	1107	1107	1107	1107	1107	1107

### Выводы по главе 3

1. В результате лабораторных экспериментов получены количественные данные и эмпирические зависимости по кинетике выгорания углерода и влиянию температурно-временного фактора и состава атмосферы на процесс обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марок DALMOND APC-75H1.

2. Проведенные исследования показали, что при тепловой обработке в окислительной атмосфере алюмопериклазоуглеродистых смолосвязанных огнеупоров происходит выгорание углерода в поверхностных слоях. Глубина выгорания зависит от температуры и времени разогрева, а также от состава атмосферы. В результате воздействия высоких температур исследуемый материал становится более пористым. Тепловая обработка огнеупоров в бескислородной атмосфере устраняет обезуглероживание, однако водопоглощение и пористость огнеупоров изменяется незначительно.

3. При проведении исследований изучен фазовый и минералогический состав ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров. Изучение образцов показало, что минеральный состав огнеупора состоит из корунда, графита, кремнезема и небольшого количества шпинелей в корунде. Для обезуглероженных слоев огнеупора характерна высокая пористость. Характерной особенностью исследуемых огнеупоров является выраженный резкий переход необезуглероженных слоев в обезуглероженные. Граница перехода фиксируется по резкому снижению содержания углерода от исходного состояния до следов. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтверждают визуальное определение обезуглероженных слоев по характерному серовато-коричневому цвету, необезуглероженные слои имеют черный цвет.

4. В результате проведенного термогравиметрического анализа образцов углеродсодержащих огнеупоров марок АМС 78-8/7HG, RI-MC175LC, MayCarb 284-AX установлено, что: алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры АМС 78-8/7HG, применяемые для футеровки стен сталеразливочных ковшей, содержащие 9,7 % С,

по сравнению с периклазоуглеродистыми RI-MC175LC и MayCarb 284-AX, применяемыми для футеровки шлакового пояса и содержащими 15,0 и 15,5 % C соответственно, характеризуются более высокой стойкостью к обезуглероживанию при нагреве до температур 1100 °C. Общая потеря массы исследуемых образцов составляет от 2 – 5 (АМС 78-8/7HG) до 11 – 20 % (RI-MC175LC; MayCarb 284-AX). Окисление углерода, содержащегося в огнеупорах начинается при температуре 450 – 500 °C, заканчивается при 980 – 1000 °C для марки АМС 78-8/7HG) и при 960 – 980 °C для марок RI-MC175LC и MayCarb 284-AX). Максимальная скорость окисления углерода (обезуглероживания огнеупора) во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °C. Соответственно в целях реализации мало-обезуглероживающего первого разогрева ковша после ремонта, для исследуемых марок огнеупоров рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 500 – 600 °C) выдержки футеровки.

## **4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ГАЗОВЫХ СТЕНДОВ ПРИ РАЗОГРЕВЕ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

В главе представлены результаты модификации и усовершенствования комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стендов разогрева сталеразливочных ковшей, представленной в работах [19, 101]. Расширены функциональные возможности математической модели, для исследования тепловой работы высокотемпературных стендов, имеющих водоохлаждаемые элементы, например кислородные водоохлаждаемые горелки. На базе модифицированной математической модели проведена серия многовариантных расчетов по исследованию влияния различных факторов на тепловую работу стендов, получен новый критерий тепловой эффективности стендов разогрева ковшевых футеровок. Разработаны энергосберегающие малообезуглероживающие температурные режимы разогрева ковшевых футеровок. Результаты исследований представлены в работах [117 – 124].

### **4.1 Совершенствование комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стендов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей**

Для комплексного исследования тепловой работы ковшевых футеровок и стендов разогрева в диссертации использована детерминированная математическая модель [19, 101]. Она имеет блочную структуру, представленную на рис. 4.1. Модель усовершенствована в целях расширения ее функционала и возможностей исследовать тепловую работу газового стенда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой (в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение), и процессов обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров рабочего слоя.

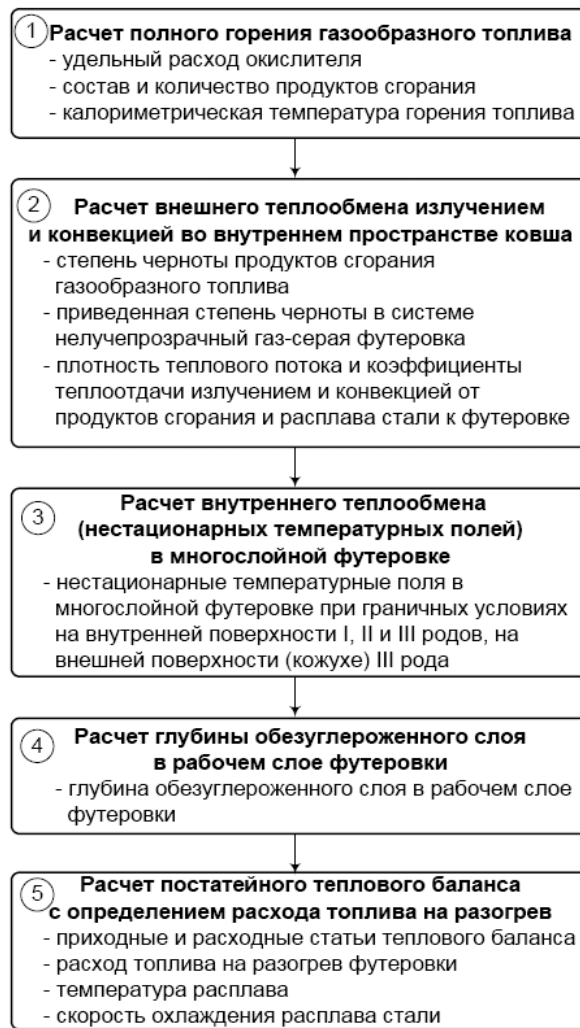


Рисунок 4.1 – Структура блоков математической модели

Расчет полного горения газообразного топлива в модели реализован по стандартной методике, представленной в работе [125].

Содержание, %, водяного пара в газе и значение коэффициента  $K$  пересчета определяли по следующим формулам [19]:

$$H_2O = \frac{100d}{803,6 + d}, \quad (4.1)$$

$$K = 1 - 0,01 \cdot H_2O, \quad (4.2)$$

где  $d$  – влагосодержание газа, г/м<sup>3</sup>.

Содержание  $i$ -го компонента во влажном газе рассчитывали по выражению [19]:

$$y_i^{\text{вл}} = y_i^c K, \quad (4.3)$$

где  $y_i^c$  – содержание компонента в сухом газе.

Низшую теплоту сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>, определяли по формуле [19]:

$$Q_{\text{н}}^p = 127,7\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 590\text{C}_2\text{H}_4 + 555\text{C}_2\text{H}_2 + 636\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10} + 1465\text{C}_5\text{H}_{12} + 234\text{H}_2\text{S}, \quad (4.4)$$

где CO, H<sub>2</sub>, ... – содержание компонента в газе, %.

Теоретическое количество, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> окислителя, необходимое для горения 1 м<sup>3</sup> газа определяли по формуле [19]:

$$L_0 = \frac{1}{O'_2} \left( 0,5\text{H}_2 + 0,5\text{CO} + \sum \left( n + \frac{m}{4} \right) \text{C}_n\text{H}_m + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right), \quad (4.5)$$

где O'<sub>2</sub> – содержание кислорода в сухом окислителе, %.

Теоретическое количество, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, влажного окислителя находили по уравнению [19]:

$$L_0^T = L_0 (1 + 0,001244d'), \quad (4.6)$$

где  $d'$  – влагосодержание окислителя, г/м<sup>3</sup>.

Действительное количество окислителя, подаваемое на горение, рассчитывали по соотношению [19]:

$$L_n = nL_0^T, \quad (4.7)$$

где  $n$  – коэффициент избытка окислителя, зависящий от типа горелочного устройства и температурного режима разогрева.

Для полного горения газообразного топлива состав и количество продуктов сгорания определяли по выражениям [19]:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum n C_n \text{H}_m); \quad (4.8)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01\left(\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \sum \frac{m}{2} C_n \text{H}_m\right) + 0,001244 d' L_n; \quad (4.9)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01(\text{N}_2 + L_n \text{N}'_2); \quad (4.10)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01(\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2); \quad (4.11)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot O'_2 (n-1) \cdot L_0^T, \quad (4.12)$$

где  $\text{N}'_2$  – содержание азота в окислителе, % .

Суммарный объем продуктов сгорания [19]:

$$V_d = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (4.13)$$

Состав продуктов сгорания в объемных процентах рассчитывали по формулам [19]:

$$R_i = \frac{V_i}{V_d} 100 \%; \quad (4.14)$$

$$\sum R_i = 100 \%.$$

Калориметрическую температуру горения определяли по уравнению [19]:

$$t_{\text{кл}} = \frac{Q_p + L_n \cdot c_B \cdot t_B + c_\Gamma \cdot t_\Gamma}{V_d \cdot c_d}, \quad (4.15)$$

где  $c_B$ ,  $c_\Gamma$  и  $c_d$  – теплоемкости окислителя, газа и дыма соответственно, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_B$  и  $t_\Gamma$  – температуры подогрева окислителя и газа, °С.

Поскольку  $c_d = f(t_{\text{кл}})$ , калориметрическую температуру горения находили в результате совместного решения следующих выражений [19]:

$$i_0 = \frac{Q_p + L_n c_B t_B + c_\Gamma t_\Gamma}{V_d}; \quad i'_0 = c_d(t_{\text{кл}}) t_{\text{кл}}, \quad (4.16)$$



где  $c_d(t_{кл})$ , – теплоемкость продуктов сгорания при температуре  $t_{кл}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $i_0$  и  $i_0'$  – энтальпии, кДж/м<sup>3</sup>.

Теплоемкости  $C_i$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), индивидуальных газов в зависимости от температуры определяли по уравнениям, предложенным в работе [125]. Теплоемкость  $C$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К), смеси газов определяем с учетом свойства аддитивности по формуле [19]:

$$C = \sum_{i=1}^n 0,01 R_i C_i. \quad (4.17)$$

Температуру горения находили посредством итерационных процессов с помощью метода половинного деления [19, 125].

Расчет внешнего теплообмена включает определение плотности  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, теплового потока излучением и конвекцией от раскаленных продуктов сгорания, содержащих трехатомные газы, к поверхности футеровки. Ее рассчитывали по соотношению [19, 125]:

$$q = C_0 \varepsilon_{пр} \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right) + \alpha_K (T_c - T_1), \quad (4.18)$$

где  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно «черного» тела;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты в системе «серый» газ – «серая» кладка;  $T_c$  и  $T_1$  – температуры среды и поверхности футеровки, К;  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Расчеты в математической модели возможно проводить для граничных условий I рода на внутренней поверхности футеровки  $T_1 = f(\tau)$ . Такие граничные условия соответствуют разогреву футеровки с постоянной скоростью увеличения ее температуры или при  $T_1 = \text{const}$  – выдержке при постоянной температуре поверхности. Возможно задание граничных условий III рода  $T_c = f(\tau)$  [19, 125].

При отличии закона изменения температуры  $t_1$  поверхности футеровки или  $t_c$  среды во времени от линейного при моделировании использовали соотношение [19, 125]:

$$t = t_0 + A_I \left( 1 - \exp \left( -B_I \frac{\tau_i}{\tau} \right) \right), \quad (4.19)$$

где  $t_0$  – начальная температура поверхности или среды, °С;  $A_I$ ,  $B_I$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от режима нагрева;  $\tau_i$  – текущий  $i$ -ый момент времени от начала нагрева, мин;  $\tau$  – суммарное время нагрева, мин.

Приведенную степень черноты в системе серый газ – серая кладка определяли по соотношению [19, 125]:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_r(\varepsilon_{\phi} + 1)/2, \quad (4.20)$$

где  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_{\phi}$  – степень черноты газа (продуктов сгорания), находящихся в рабочем пространстве ковша и поверхности рабочего слоя футеровки.

Степень черноты продуктов сгорания, содержащих в своем составе  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , вычисляли с учетом свойства аддитивности [19, 125]:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (4.21)$$

где  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  и  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – степени черноты соединений  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\beta$  – поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния толщины газового слоя и парциального давления  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  на энергию излучения водяных паров.

Степень черноты излучающих газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_2$  рассчитывали по формулам [19, 125, 126]:

$$\varepsilon_{R_{O_2}} = e^{\left( - \left( 1,4918 + 0,3980 \left( P_{R_{O_2}} l_{\text{эф}} \right)^{-0,2609} + \left( 0,053 - 0,1239 \left( P_{R_{O_2}} l_{\text{эф}} \right)^{0,1718} \right) 0,01 t_r + \left( 0,003504 + 0,0009446 \left( P_{R_{O_2}} l_{\text{эф}} \right)^{0,5470} \right) \left( 0,01 t_r^2 \right) \right) \right)}, \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_{R_{H_2O}} = e^{\left(0,5708-1,2016(P_{H_2O}l_{\text{эф}})^{-0,2146} - \left(0,0038+0,05133(P_{H_2O}l_{\text{эф}})^{-0,2105}\right)0,01t_{\Gamma}\right)}, \quad (4.23)$$

$$\beta = 1 + \left(-0,5 + 5,3114(P_{H_2O}l_{\text{эф}})^{-0,01191}\right)P_{H_2O}^{0,74+0,03705(P_{H_2O}l_{\text{эф}})^{-0,1561}}, \quad (4.24)$$

где  $P_{R_{O_2}} = P_{CO_2} + P_{SO_2}$  – парциальное давление соединений  $CO_2$  и  $SO_2$ , численно равное суммарной доле этих газов в продуктах сгорания при атмосферном давлении, бар;  $l_{\text{эф}}$  – эффективная длина пути луча, м;  $t_{\Gamma}$  – температура газа, °C.

Эффективную длину пути луча определяли по соотношению [19, 125]:

$$l_{\text{эф}} = 3,6 \frac{V_{\text{г.п}}}{F_{\text{кл}}}, \quad (4.25)$$

где  $V_{\text{г.п}}$  – объем внутреннего пространства ковша, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{кл}}$  – площадь поверхности кладки, ограничивающей газовый объем, м<sup>2</sup>.

Коэффициент  $\alpha_k$  теплоотдачи конвекцией от газообразных продуктов сгорания к кладке в зависимости от конструкции стенда и горелочного устройства принимали на уровне 30 – 80 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [19].

На кожухе ковша для всех случаев расчета задавали граничное условие III рода. Коэффициент теплоотдачи от кожуха в окружающую среду определяли по соотношению [19, 125]:

$$\alpha_c = 4,8 (t_k - t_{o.c})^{0,25}, \quad (4.26)$$

где  $t_k$  – температура кожуха ковша, °C;  $t_{o.c}$  – температура окружающей среды, °C.

Процессы внутреннего теплообмена, включающие моделирование температурных полей в многослойной кладке, рассчитывали с помощью метода конечных разностей (МКР) [19, 88, 125]. Решали дифференциальное уравнение теплопроводности с одномерным температурным полем для многослойной пластины, слои которой выполнены из различных материалов с переменными теплофизическими свойствами [19, 125]:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right); \quad (4.27)$$

здесь  $c$  – теплоемкость;  $t$  – температура;  $\rho$  – плотность;  $\tau$  – время;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $0 \leq x \leq X$ ;  $X$  – толщина футеровки.

Дифференциальное уравнение (4.27) дополнили краевыми условиями.

Граничные условия (при разогреве футеровки реализованы несимметричный нагрев и охлаждение) задавали для поверхностей рабочего «р» слоя и кожуха «к» индивидуально, при нагреве и охлаждении при граничных условиях III рода [19, 125]:

$$-\left(\lambda_p(t)\frac{\partial t_p}{\partial x}\right)_p = \alpha_\Sigma^p(t_c^p - t_1^p); \quad (4.28)$$

$$-\left(\lambda_k(t)\frac{\partial t_k}{\partial x}\right)_k = \alpha_c^k(t_k^k - t_{o.c}^k). \quad (4.29)$$

Коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности футеровки и на кожухе рассчитывали, используя соотношения (4.18) и (4.26).

При транспортировании расплава на внутренней поверхности футеровки принимали граничные условия I рода [19, 125]:

$$t_1^p = t_p, \quad (4.30)$$

где  $t_p$  – температура расплава стали, °С.

Теплофизические условия – коэффициенты теплоемкости  $c$ , кДж/(кг · К), теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · К), заданы функциями от средней температуры  $t_{ср}$  подслоя [19, 125]; плотность слоев футеровки  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, считали постоянной во всем исследуемом температурном интервале.

Начальные условия – нагрев футеровки проводят при равномерном начальном распределении температуры по сечению  $t_0(x) = \text{const} = 20$  °С.

Геометрические условия – при разогреве и охлаждении футеровки решали несимметричную задачу внутреннего теплообмена, характерный размер принимали равным толщине футеровки.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (4.27) аппроксимировали в прямоугольной системе координат по оси  $x$ . В качестве базового варианта модели использовали четырехслойную футеровку, состоящую из рабочего, арматурного, теплоизоляционного слоев и кожуха. Для моделирования температурных полей использовали равномерную ( $\Delta x = \text{const}$ ) в пределах каждого слоя сетку. Каждый слой разбивали на пять подслоев. Шаг по координате в каждом слое определяли по соотношениям  $\Delta x_p = \delta_p/5$ ;  $\Delta x_a = \delta_a/5$ ;  $\Delta x_t = \delta_t/5$ ;  $\Delta x_k = \delta_k/5$ ; где  $\delta_p$ ,  $\delta_a$ ,  $\delta_t$  и  $\delta_k$  – толщины рабочего, арматурного, теплоизоляционного слоев и кожуха соответственно, м. Временные интервалы  $\Delta t$  определяли из условий устойчивости решения [19, 125].

Из аппроксимированного уравнения (4.27) находили температуры  $\Delta t_i$  во всех внутренних узлах сеточной модели, изменение которой в пограничных слоях определяли с учетом температур на границах сеточной области (поверхностях сопряжения). Температуры на поверхностях сопряжения индивидуально для внутренней поверхности футеровки и кожуха находили из граничных условий, связывающих внешний и внутренний теплообмен. Коэффициент теплопроводности в пограничных слоях определяли при средней температуре в пограничном полуслое, толщины которых равны  $\Delta x_p/2$  и  $\Delta x_k/2$ . Искомые температуры поверхности находили с помощью метода последовательных приближений.

Расчет нового распределения температур в узлах сеточной области определяли по формуле [19, 125]:

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \Delta t_i. \quad (4.31)$$

где  $j$  – временной интервал.

Расчет глубины обезуглероженного слоя в углеродсодержащих огнеупорах проводили на основе закона квадратного корня, отражающего диффузионный ме-

ханизм обезуглероживания. В математической модели принимали, что глубина этого слоя в зависимости от времени нагрева рассчитывается по соотношению [19]

$$\delta_{об} = k \sqrt{\tau_b}, \quad (4.32)$$

где  $k$  – константа скорости обезуглероживания, мм/мин<sup>0.5</sup>;  $\tau_b$  – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

Для выражения (4.32) принимали, что константа скорости окисления подчиняется уравнению Аррениуса, которое имеет вид аналогичный соотношению (2.4) [19]:

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (4.33)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от химического состава огнеупора, атмосферы и других факторов, мм/мин<sup>0.5</sup>, К;  $T$  – температура слоя, К.

Как было установлено выше, процессы выгорания углерода интенсифицируются при температурах 600 – 650 °С. В связи с этим расчет процессов обезуглероживания начинали в момент времени  $\tau_0$  при достижении заданной температуры  $t_{ок}$  на поверхности огнеупора [19].

Уравнения (4.32) и (4.33) позволяют определить глубину обезуглероженного слоя при постоянной температуре поверхности огнеупора. В связи с этим непрерывную траекторию изменения температуры поверхности  $t = f(\tau)$  заменяли отрезками продолжительностью  $\Delta\tau$ , при этом принимали, что на участке  $\Delta\tau$  температура поверхности огнеупора  $t$  постоянна и равна средней температуре  $t_i^{cp}$  поверхности в  $i$ -ом временном интервале. Таким образом, на каждом  $i$ -ом временном интервале рассчитывали прирост толщины обезуглероженного слоя  $\delta_{об,i}$  [19].

Обезуглероженный слой за весь период нагрева рассчитывали посредством суммирования приростов обезуглероженного слоя на каждом временном интервале по выражению [19]:

$$\delta_{об} = \sum_{i=1}^n \Delta \delta_{об.i} . \quad (4.34)$$

Тепловой баланс рассчитывали за текущий временной интервал (шаг по времени) и суммарный – за весь период разогрева [19, 118]. Принимали допущение, что проводится разогрев высушенной футеровки, потери тепла на нагрев и испарение влаги, в которой пренебрежимо малы.

Приходные статьи определяли по соотношениям:

1) Химическое тепло топлива, кДж [19, 118]:

$$Q_T^x = 3600 \cdot B_T \cdot Q_H^p \cdot \Delta \tau, \quad (4.35)$$

где  $B_T$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/ч;  $\Delta \tau$  – временной интервал, с.

2) Физическое тепло воздуха (рассчитывается при наличии на стенде подогрева окислителя, идущего на горение), кДж [19, 118]:

$$Q_B^\phi = 3600 \cdot B_T \cdot L_n \cdot c_B \cdot t_B \cdot \Delta \tau. \quad (4.36)$$

3) Физическое тепло газа (рассчитывается при наличии на стенде подогрева газа, идущего на горение), кДж [19, 118]:

$$Q_G^\phi = 3600 \cdot B_T \cdot c_G \cdot t_G \cdot \Delta \tau. \quad (4.37)$$

4) Химическое тепло обезуглероживания огнеупора, кДж [19, 118]:

$$Q_{об}^x = 339 \cdot (C_H - C_K) \cdot \rho_p \cdot V_{об}, \quad (4.38)$$

где  $C_H$  и  $C_K$  – начальное и конечное (остаточное) содержание углерода в обезуглероженном слое огнеупора, % (по массе);  $\rho_p$  – плотность рабочего слоя огнеупора, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{об}$  – объем обезуглероженного слоя футеровки, м<sup>3</sup>.

Объем обезуглероженного слоя футеровки ( $V_{об}^c$  стен и днища  $V_{об}^д$ ) определяли по соотношению [19]:

$$V_{об} = V_{об}^c + V_{об}^д = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot (R_1 + R_2) \cdot \delta_{об} \cdot h + \pi \cdot R_2^2 \cdot \delta_{об}, \quad (4.39)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы футеровки в верхней части ковша и в области днища соответственно, м;  $\delta_{об}$  – глубина обезуглероженного слоя футеровки, м;  $h$  – высота стен ковша, м.

Расходные статьи рассчитывали по соотношениям:

1) Тепло, аккумулируемое футеровкой  $Q_{акк.ф}$ , кДж, определяли как сумму тепла, аккумулированного рабочим  $Q_{акк.р}$ , кДж, арматурным  $Q_{акк.а}$ , кДж, теплоизоляционным  $Q_{акк.т}$ , кДж, слоями и кожухом  $Q_{акк.к}$ , кДж [19, 118]:

$$Q_{акк.ф} = Q_{акк.р} + Q_{акк.а} + Q_{акк.т} + Q_{акк.к}; \quad (4.40)$$

$$Q_{акк.р} = m_p \cdot (t_{p,ср}^к \cdot c_p^к - t_{p,ср}^н \cdot c_p^н); \quad (4.41)$$

$$Q_{акк.а} = m_a \cdot (t_{a,ср}^к \cdot c_a^к - t_{a,ср}^н \cdot c_a^н); \quad (4.42)$$

$$Q_{акк.т} = m_t \cdot (t_{t,ср}^к \cdot c_t^к - t_{t,ср}^н \cdot c_t^н); \quad (4.43)$$

$$Q_{акк.к} = m_k \cdot (t_{k,ср}^к \cdot c_k^к - t_{k,ср}^н \cdot c_k^н), \quad (4.44)$$

где  $m_p$ ,  $m_a$ ,  $m_t$ ,  $m_k$  – масса слоев футеровки, кг;  $t_{p,ср}^к$ ,  $t_{a,ср}^к$ ,  $t_{t,ср}^к$ ,  $t_{k,ср}^к$  – средние конечные температуры слоев футеровки, °С;  $t_{p,ср}^н$ ,  $t_{a,ср}^н$ ,  $t_{t,ср}^н$ ,  $t_{k,ср}^н$  – средние начальные температуры слоев футеровки, °С;  $c_p^к$ ,  $c_a^к$ ,  $c_t^к$ ,  $c_k^к$  – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей конечной средней температуре слоев, кДж/(кг · К);  $c_p^н$ ,  $c_a^н$ ,  $c_t^н$ ,  $c_k^н$  – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей начальной средней температуре слоев, кДж/(кг · К).

2) Потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду, кДж [19, 118]:

$$Q_T = 0,001 \cdot \alpha_c \cdot (t_k - t_{o.c}) \cdot F_k \cdot \Delta\tau, \quad (4.45)$$

где  $F_k$  – площадь теплоотдающей поверхности (крышки, дна и стенок кожуха ковша), м<sup>2</sup>.

3) Потери тепла с уходящим дымом, кДж [19, 118]:



$$Q_d = 3600 \cdot B_T \cdot V_d \cdot t_{yx} \cdot c_{yx} \cdot \Delta\tau, \quad (4.46)$$

где  $t_{yx}$  и  $c_{yx}$  – температура и теплоемкость уходящих из полости ковша продуктов сгорания, °C и кДж/(м<sup>3</sup> · K).

4) Потери тепла в результате химического недожога, кДж [19, 118]:

$$Q_{xn} = 3600 \cdot k_n \cdot B_T \cdot Q_n^p \cdot \Delta\tau, \quad (4.47)$$

где  $k_n$  – коэффициент учитывающий химический недожег, для газообразного топлива находится на уровне 0,01 – 0,03.

5) Потери тепла с водой (определяются в случае наличия водоохлаждаемых элементов, горелка и т.п.), кДж [118]

$$Q_{вод} = G_{вод} \cdot c_{вод} \cdot \Delta t_{вод} \cdot \Delta\tau, \quad (4.48)$$

где  $G_{вод}$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $c_{вод}$  – теплоемкость воды, кДж/(м<sup>3</sup> · K);  $\Delta t_{вод}$  – разность температур воды на входе и выходе из системы водяного охлаждения, °C.

6) Потери тепла излучением через технологические щели (зазор между крышкой стенда и ковшом), кДж, определяли по соотношениям представленным в работе [19, 118]

$$Q_{изл} = 0,001 \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{о.с}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_n \cdot \Delta\tau, \quad (4.49)$$

где  $\varepsilon_n$  – коэффициент излучения проема;  $\varphi$  – коэффициент диафрагмирования, зависящий от высоты и глубины проема;  $F_n$  – площадь проема, м<sup>2</sup>.

7) Неучтенные тепловые потери принимали равными 10 % от суммы статей, которые не зависят от расхода топлива, и определяли по соотношению:

$$Q_n = 0,1 \cdot (Q_{акк.ф} + Q_T + Q_{вод}). \quad (4.50)$$

Для нахождения расхода топлива сумму приходных статей приравнивали к сумме расходных статей [19, 118]

$$Q_{\Gamma}^{\kappa} + Q_{\text{в}}^{\phi} + Q_{\Gamma}^{\phi} + Q_{\text{об}}^{\kappa} = Q_{\text{акк.ф}} + Q_{\Gamma} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{хн}} + Q_{\text{вод}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{н}}. \quad (4.51)$$

Расход топлива, м<sup>3</sup>/ч, определяли по выражению [19, 118]:

$$\begin{aligned} B_{\Gamma} = & [m_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{п}}^{\kappa} - t_{\text{п,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{п}}^{\text{н}}) + m_{\text{а}} \cdot (t_{\text{а,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{а}}^{\kappa} - t_{\text{а,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{а}}^{\text{н}}) + m_{\text{т}} \cdot (t_{\text{т,ср}}^{\kappa} \cdot \\ & c_{\text{т}}^{\kappa} - t_{\text{т,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{т}}^{\text{н}}) + m_{\text{к}} \cdot (t_{\text{к,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{к}}^{\kappa} - t_{\text{к,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{к}}^{\text{н}}) + 0,001 \cdot \alpha_{\text{с}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{о.с}}) \cdot F_{\text{к}} \cdot \Delta\tau \\ & + G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} \cdot \Delta t_{\text{вод}} \cdot \Delta\tau + 0,001 \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_{\text{п}} \cdot \Delta\tau + 0,1 \cdot \\ & (m_{\text{п}} \cdot (t_{\text{п,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{п}}^{\kappa} - t_{\text{п,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{п}}^{\text{н}}) + m_{\text{а}} \cdot (t_{\text{а,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{а}}^{\kappa} - t_{\text{а,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{а}}^{\text{н}}) + m_{\text{т}} \cdot (t_{\text{т,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{т}}^{\kappa} - \\ & t_{\text{т,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{т}}^{\text{н}}) + m_{\text{к}} \cdot (t_{\text{к,ср}}^{\kappa} \cdot c_{\text{к}}^{\kappa} - t_{\text{к,ср}}^{\text{н}} \cdot c_{\text{к}}^{\text{н}}) + 0,001 \cdot \alpha_{\text{с}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{о.с}}) \cdot F_{\text{к}} \cdot \Delta\tau + \\ & G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} \cdot \Delta t_{\text{вод}} \cdot \Delta\tau + 0,001 \cdot \varepsilon_{\text{п}} \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_{\text{п}} \cdot \Delta\tau) - 339 \cdot \\ & (C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) \cdot \rho_{\text{п}} \cdot V_{\text{об}}] / [3600 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \Delta\tau + 3600 \cdot L_{\text{н}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \cdot \Delta\tau + 3600 \cdot c_{\Gamma} \cdot \\ & t_{\Gamma} \cdot \Delta\tau - 3600 \cdot \\ & V_{\text{д}} \cdot t_{\text{yx}} \cdot c_{\text{yx}} \cdot \Delta\tau - 3600 \cdot k_{\text{н}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \Delta\tau]. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Математическая модель предусматривает расчет охлаждения расплава при транспортировании в ковше и последующей разливке. Расчет средней температуры расплава на основе решения балансового уравнения [19, 118]

$$m_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot (t_{\text{ст}}^{\text{н}} - t_{\text{ст}}^{\kappa}) = Q_{\text{акк.ф}} + Q_{\Gamma} + Q_{\text{н}}, \quad (4.53)$$

где  $m_{\text{ст}}$  и  $c_{\text{ст}}$  – масса и теплоемкость расплава стали, кг и кДж/(кг · К);  $t_{\text{ст}}^{\text{н}}$  и  $t_{\text{ст}}^{\kappa}$  – средние по объему начальная и конечная температуры жидкой стали, °С.

Среднюю температуру жидкой стали после нахождения в ковше в течение временного интервала  $\Delta\tau$  определяли по соотношению [19, 118]

$$t_{\text{ст}}^{\kappa} = t_{\text{ст}}^{\text{н}} - (Q_{\text{акк.ф}} + Q_{\Gamma} + Q_{\text{н}}) / (m_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}}), \quad (4.54)$$

а скорость охлаждения расплава  $v_p$ , °C/с рассчитывали по формуле [19, 118]:

$$v_p = (t_{\text{ст}}^{\text{H}} - t_{\text{ст}}^{\text{K}}) / \Delta\tau, \quad (4.55)$$

Результаты проверки адекватности и точности математической модели представлены в работе [19] погрешность расчета расхода топлива не превышает 1 – 11 %. Погрешности расчетов температур: поверхности рабочего слоя не превышает в среднем  $\pm 5 - 25$  °C, на стыке рабочего и арматурного слоев достигает 30 – 50 °C, кожуха в конце нагрева составила всего 5 – 10 °C. Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров рабочего слоя футеровки по результатам моделирования составила 10,2 мм, при промышленных экспериментах – 9 – 11 мм. Для прогнозных и инженерных расчетов точность математической модели можно считать удовлетворительной [19].

#### **4.2 Разработка нового критерия тепловой эффективности стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей**

При оценке тепловой эффективности работы стенов для разогрева сталеразливочных ковшей разной емкости, с футеровкой различной конструкции и применяемых для ее выполнения огнеупоров и теплоизолирующих материалов, отапливаемых газом различной калорийности, возникают определенные трудности, так как часовой расход или суммарный объем газа на разогрев не являются информативными величинами. Определение основного показателя эффективности тепловых агрегатов – коэффициента полезного действия требует составления теплового баланса, а соответственно проведения дополнительных расчетов или экспериментов. В связи с этим возникает необходимость в показателе, характеризующем экономичность работы стенов, а также отражающем удельные затраты топлива на разогрев, отнесенные к единице массы стали, транспортируемой в ковш. При разработке такого параметра за основу принят удельный расход условного топлива, затрачиваемого на тепловую обработку одной тонны стали.

Эту величину используют при оценке экономичности и эффективности тепловой работы металлургических печей [125, 127].

Для стандов разогрева в общем случае удельный расход  $B_{уд}$  условного топлива на тонну транспортируемой стали может быть определен по соотношению [128]:

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{Q}{(E - M_{ш})}, \quad (4.56)$$

где  $Q_p^H$  – теплота сгорания топлива (природного газа), МДж/м<sup>3</sup>;  $Q$  – суммарный объем газа, затрачиваемого на разогрев, м<sup>3</sup>.

Если разогрев производится при постоянном расходе топлива, то расчет можно проводить по следующему уравнению [128]:

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \cdot \frac{B \cdot \tau}{(E - M_{ш})}, \quad (4.57)$$

где  $B$  – средний расход топлива за весь период разогрева, м<sup>3</sup>/ч.

Для электрических стандов сопротивления, получающих в последнее время все большее распространение, удельный расход можно определить по уравнению [128]:

$$B_{уд} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{29,3} \frac{IU\tau}{(E - M_{ш})}, \quad (4.58)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение в электрической цепи питания нагревателей, В.

### **4.3 Исследование влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стандов высокотемпературного разогрева**

В настоящее время на сталелитейных предприятиях в эксплуатации находится значительное количество сталеразливочных ковшей, отличающихся гео-

метрическими размерами и емкостью. Наиболее крупные производители стали, имеющие в своем составе конвертерные и электросталеплавильные цеха, используют в основном сталеразливочные ковши средней (70 – 220 т) и большой (220 – 480 т) емкости [4]. В условиях конкурентной борьбы металлургических предприятий за снижение себестоимости выпускаемой продукции актуальным и перспективным является повышение тепловой эффективности работы стенов, внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий, направленных на экономию топлива и повышение стойкости футеровок. В связи с этим практический интерес представляет исследование влияния геометрических размеров и емкости ковша на тепловую эффективность работы стенов.

С использованием комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стенов для разогрева футеровок сталеразливочных ковшей проведено исследование влияния емкости (геометрических размеров) ковша на технико-экономические показатели работы стенов. Многовариантные расчеты осуществляли на примере разогрева сталеразливочных ковшей номинальной емкостью  $E$ , равной 90, 130, 220, 350 и 480 т, имеющих геометрические размеры, представленные в табл. 4.1 [4]. Рабочий слой футеровки выполнен из алюмопери-клазоуглеродистого смолосвязанного огнеупора марки APC-75H1; арматурный – из огнеупора марки МКРКП-45; между рабочим и арматурным слоями находится буферная засыпка марки ВГБМ-80; теплоизоляционный слой выполнен из материала МКРКГ-400; броня ковша из низколегированной стали. Принимали, что разогрев футеровки осуществляли на оборудованном теплоизолированной крышкой стеном, отапливаемом природным газом следующего химического состава: 91,50 %  $\text{CH}_4$ ; 3,07 %  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 1,73 %  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,9 %  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 2,34 %  $\text{N}_2$ ; 0,45 %  $\text{CO}_2$ ; 0,01 %  $\text{O}_2$ . Между крышкой и ковшом предусмотрен технологический зазор  $b$ , величину которого в расчетах принимали равной 50, 150 и 250 мм. При проведении расчетов коэффициент расхода окислителя принимали равным 1,1, а температуру воздуха, подаваемого на горение, – 10, 200 и 400 °C (рис. 4.2).

Таблица 4.1 – Геометрические размеры и конструкция футеровки сталеразливочных ковшей различной емкости

$E$ , т	$M_{ш}$ , т	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$h$ , мм	$\delta_1$ , мм	$\delta_2$ , мм	$\delta_3$ , мм	$\delta_4$ , мм
90	4,2	2767	3189	3180	150	100	10	20
130	4,8	3265	3600	3350	180	110	10	24
220	6,0	3386	3950	4700	190	120	10	25
350	10,0	4015	4750	5250	200	125	10	40
480	14,5	4615	5340	5660	250	150	10	40

П р и м е ч а н и е.  $M_{ш}$  – масса шлака;  $D_1$  и  $D_2$  – внутренний и наружный диаметры ковша;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  и  $\delta_4$  – толщина рабочего, арматурного, теплоизоляционного слоев и кожуха.

В качестве основного расчетного режима приняли разогрев с постоянной, максимально допустимой по условиям трещинообразования скоростью увеличения температуры поверхности рабочего слоя, которая по рекомендациям производителей огнеупоров для алюмопериклазоуглеродистых марок находится на уровне 60 – 100 °С/ч. Соответственно время  $\tau$  разогрева предварительно высушенной футеровки приняли 24 ч. Температура греющей среды изменялась линейно от 450 до 1250 °С со скоростью 33,3 °С/ч.

В табл. 4.2, 4.3 и на рис. 4.2 представлены результаты многовариантных расчетов для 45 различных режимов разогрева сталеразливочных ковшей. Анализируя полученные данные, можно сделать следующий вывод. Тепловая эффективность и экономичность стендов разогрева зависят прямо пропорционально от емкости сталеразливочных ковшей для всех серий значений температуры подогрева воздуха и величины зазоров между крышкой и ковшом. Для ковшей емкостью 90 т увеличение температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С в комплексе с уменьшением величины зазора между крышкой и ковшом с 250 до 50 мм приводит к росту КПД стенда с 37,0 до 58,3 % и снижению удельного расхода условного топлива с 40,8 до 26,0 кг у.т./т транспортируемой стали, т.е. почти в 1,6 раза.

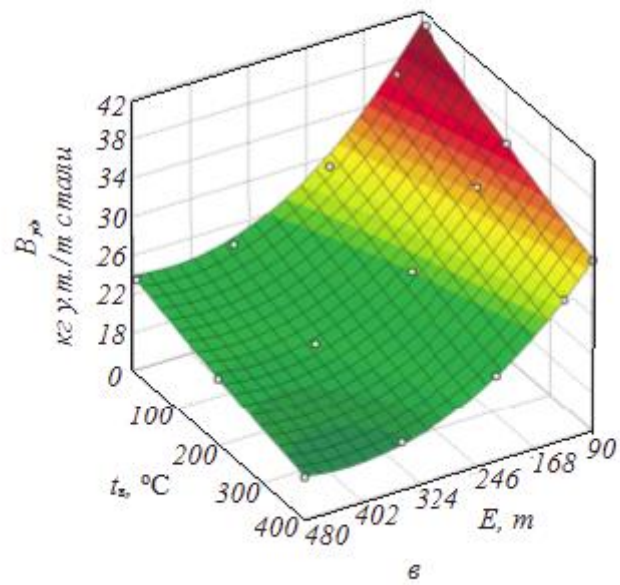
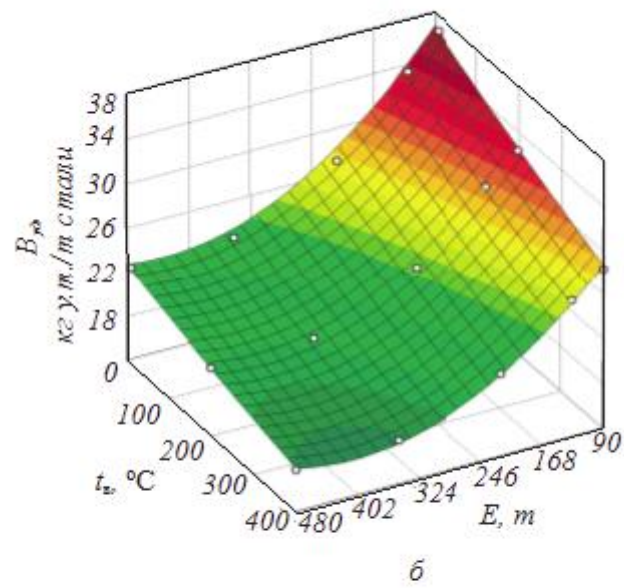
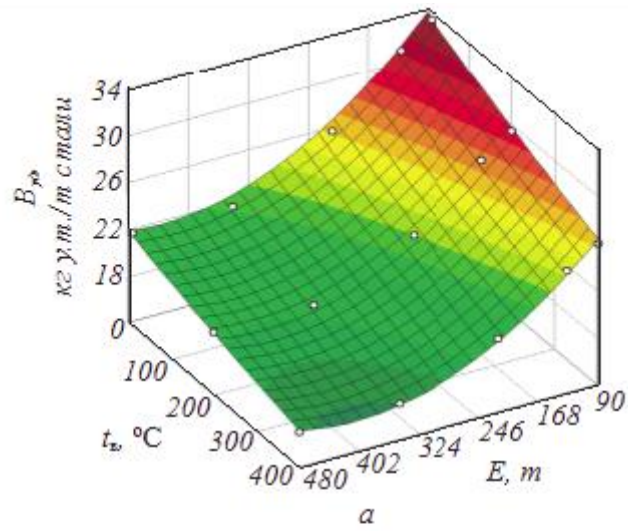


Рисунок 4.2 – Зависимость удельного расхода условного топлива от емкости ковша и температуры подогрева воздуха при величине зазора между крышкой и ковшом 50 мм (а), 150 мм (б) и 250 мм (в)

Таблица 4.2 – Параметры и характеристики исследуемых режимов нагрева

$E$ , Т	$b$ , м	$t_{\text{подг}}$ , °С	$t_{\text{п.кон}}$ , °С	$t_{\text{р-а}}$ , °С	$t_{\text{кож}}$ , °С	$Q$ , м <sup>3</sup>	$B$ , м <sup>3</sup> /ч	$B_{\text{уд}}$ , кг у.т./ т ст.	КПД, %
90	50	400	1195	1059	306	1747	72,8	26,0	58,3
	150	400				1914	79,8	28,4	53,2
	250	400				2129	88,7	31,7	47,8
	50	200				1980	82,5	29,5	51,4
	150	200				2172	90,5	32,3	46,9
	250	200				2419	100,8	36,0	42,1
	50	10				2244	93,5	33,4	45,4
	150	10				2464	102,7	36,6	41,3
	250	10				2749	114,5	40,8	37,0
130	50	400	1189	1020	300	2400	100,0	24,4	60,1
	150	400				2576	107,3	26,3	56,0
	250	400				2800	116,7	28,6	51,5
	50	200				2721	113,4	27,7	53,0
	150	200				2923	121,8	29,8	49,4
	250	200				3181	132,5	32,4	45,4
	50	10				3084	128,5	31,4	46,8
	150	10				3316	138,2	33,7	43,5
	250	10				3612	150,5	36,8	40,0
220	50	400	1189	1001	287	3395	141,5	20,3	61,9
	150	400				3585	149,4	21,4	58,6
	250	400				3825	159,4	22,8	54,9
	50	200				3849	160,4	22,9	54,6
	150	200				4067	169,4	24,3	51,7
	250	200				4343	181,0	25,9	48,4
	50	10				4360	181,7	26,0	48,2
	150	10				4611	192,1	27,4	45,6
	250	10				4929	205,4	29,4	42,6
350	50	400	1193	989	248	4548	189,5	17,1	64,5
	150	400				4773	198,9	17,9	61,4
	250	400				5056	210,7	18,9	58,0
	50	200				5154	214,8	19,4	56,9
	150	200				5413	225,5	20,3	54,2
	250	200				5739	239,1	21,5	61,1
	50	10				5839	243,3	21,9	50,2
	150	10				6137	255,7	23,1	47,8
	250	10				6511	271,3	24,4	45,0
480	50	400	1183	906	198	6231	259,6	17,0	66,1
	150	400				6463	269,3	17,7	63,7
	250	400				6749	281,2	18,5	61,0
	50	200				7063	294,3	19,4	58,3
	150	200				7330	305,4	20,1	56,2
	250	200				7659	319,1	20,9	53,8
	50	10				8003	333,5	22,0	51,5
	150	10				8310	346,3	22,8	49,6
	250	10				8689	362,0	23,8	47,4

П р и м е ч а н и е.  $t_{\text{подг}}$ ,  $t_{\text{п.кон}}$ ,  $t_{\text{р-а}}$ ,  $t_{\text{кож}}$  – температуры подогрева воздуха, поверхности футеровки в конце разогрева, на стыке рабочего и арматурного слоев, кожуха ковша.



Таблица 4.3 – Тепловой баланс стенов для исследуемых вариантов нагрева

$E, \text{ т}$	$b, \text{ мм}$	$t_{\text{подг}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{т}}^{\text{х}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{ок}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{об}}^{\text{х}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{теп}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{д}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{н.п}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{из}}, \text{ \%}$	$Q_{\text{ак.ф}}, \text{ \%}$				
										всего	в том числе по слоям			
											раб.	арм.	теп.	кож.
90	50	400	83,4	13,7	2,9	8,8	33,6	6,8	1,8	49,0	31,7	15,0	0,2	2,1
	150		83,6	13,8	2,6	8,1	34,3	6,7	6,1	44,8	29,0	13,8	0,1	1,9
	250		83,8	13,8	2,4	7,3	35,0	6,6	10,7	40,4	26,2	12,4	0,1	1,7
	50	200	90,1	7,1	2,8	8,4	36,5	6,6	1,7	46,7	30,3	14,3	0,1	2,0
	150		90,3	7,1	2,5	7,7	37,2	6,5	5,8	42,7	27,7	13,1	0,1	1,8
	250		90,6	7,1	2,3	6,9	38,0	6,5	10,2	38,5	25,0	11,8	0,1	1,6
	50	10	97,4	–	2,6	8,0	39,6	6,4	1,6	44,4	28,8	13,6	0,1	1,9
	150		97,6	–	2,4	7,3	40,3	6,3	5,5	40,6	26,3	12,5	0,1	1,7
	250		97,9	–	2,1	6,5	41,1	6,3	9,6	36,5	23,7	11,2	0,1	1,5
130	50	400	83,7	13,8	2,5	7,2	33,9	6,7	1,4	50,7	34,0	14,3	0,2	2,2
	150		83,8	13,8	2,4	6,7	34,4	6,7	4,8	47,3	31,8	13,3	0,1	2,1
	250		84,0	13,8	2,2	6,2	34,9	6,4	8,5	43,6	29,3	12,3	0,1	1,9
	50	200	90,4	7,1	2,4	6,9	36,8	6,6	1,4	48,4	32,5	13,6	0,2	2,1
	150		90,6	7,1	2,3	6,4	37,4	6,5	4,6	45,1	30,4	12,7	0,1	1,9
	250		90,7	7,1	2,1	5,9	38,0	6,5	8,1	41,6	28,0	11,7	0,1	1,8
	50	10	97,8	–	2,3	6,5	39,8	6,4	1,3	46,0	30,9	13,0	0,1	2,0
	150		97,9	–	2,1	6,1	40,4	6,3	4,4	42,8	28,8	12,1	0,1	1,8
	250		98,0	–	2,0	5,6	41,1	6,3	7,7	39,4	26,5	11,1	0,1	1,7
220	50	400	83,5	13,8	2,7	6,2	33,7	6,7	1,1	52,1	35,0	14,8	0,2	2,1
	150		83,6	13,8	2,6	5,9	34,1	6,7	3,7	49,4	33,3	13,9	0,2	2,0
	250		83,8	13,8	2,4	5,6	34,6	6,7	6,7	46,4	31,2	13,1	0,1	2,0
	50	200	90,3	7,1	2,6	6,0	36,7	6,6	1,0	49,8	33,6	14,0	0,2	2,0
	150		90,4	7,1	2,4	5,6	37,1	6,5	3,6	47,2	31,8	13,4	0,1	1,9
	250		90,6	7,1	2,3	5,3	37,6	6,5	6,4	44,2	29,8	12,5	0,1	1,8
	50	10	97,6	–	2,4	5,7	39,7	6,4	1,0	47,3	31,9	13,4	0,1	1,9
	150		97,7	–	2,3	5,4	40,1	6,4	3,4	44,8	30,2	12,7	0,1	1,8
	250		97,8	–	2,2	5,0	40,6	6,3	6,1	42,0	28,3	11,9	0,1	1,7
350	50	400	83,5	13,8	2,7	4,2	33,7	6,8	1,0	54,3	36,5	14,8	0,1	2,9
	150		83,6	13,8	2,6	4,0	34,0	6,7	3,4	51,8	34,9	14,0	0,1	2,8
	250		83,8	13,8	2,4	3,8	34,4	6,7	6,0	49,0	33,0	13,3	0,1	2,6
	50	200	90,3	7,1	2,6	4,0	36,6	6,6	0,9	51,8	34,9	14,0	0,1	2,8
	150		90,4	7,1	2,4	3,9	37,0	6,5	3,2	49,4	33,3	13,4	0,1	2,6
	250		90,5	7,1	2,3	3,6	37,4	6,5	5,8	46,7	31,4	12,7	0,1	2,5
	50	10	97,6	–	2,4	3,8	39,6	6,4	0,9	49,3	33,2	13,4	0,1	2,5
	150		97,7	–	2,3	3,7	40,0	6,4	3,0	46,9	31,6	12,7	0,1	2,6
	250		97,8	–	2,2	3,5	40,5	6,3	5,5	44,3	29,8	12,0	0,1	2,3
480	50	400	83,8	13,8	2,4	2,7	33,9	6,7	0,8	55,9	39,8	14,0	0,1	2,0
	150		83,9	13,8	2,3	2,6	34,2	6,7	2,6	53,9	38,3	13,5	0,1	2,0
	250		83,9	13,8	2,2	2,5	34,5	6,7	4,6	51,7	36,8	12,9	0,1	1,9
	50	200	90,6	7,1	2,3	2,6	36,8	6,6	0,7	53,3	37,9	13,3	0,1	2,0
	150		90,6	7,1	2,2	2,5	37,1	6,5	2,5	51,4	36,6	12,8	0,1	1,9
	250		90,7	7,1	2,1	2,4	37,5	6,5	4,4	49,2	35,0	12,3	0,1	1,8
	50	10	97,8	–	2,2	2,4	39,9	6,4	0,7	50,6	36,0	12,6	0,1	1,9
	150		97,9	–	2,1	2,3	40,2	6,3	2,3	48,8	35,0	12,1	0,1	1,8
	250		98,0	–	2,0	2,2	40,5	6,3	4,2	46,7	33,2	11,7	0,1	1,7

Примечание.  $Q_{\text{т}}^{\text{х}}$  – химическое тепло топлива;  $Q_{\text{ок}}$  – физическое тепло окислителя;  $Q_{\text{об}}^{\text{х}}$  – химическое тепло обезуглероживания огнеупора;  $Q_{\text{теп}}$  – потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду;  $Q_{\text{д}}$  – потери тепла с уходящим дымом;  $Q_{\text{н.п}}$  – неучтенные потери;  $Q_{\text{из}}$  – потери тепла излучением через зазор между крышкой стенда и ковшом;  $Q_{\text{ак.ф}}$  – тепло, аккумулируемое футеровкой (рабочим, арматурным, теплоизоляционными слоями и кожухом).

Для 480-т ковшей аналогичные изменения температуры подогрева воздуха и зазора между крышкой стенда и ковшом приводят к росту КПД стенда с 47,4 до 66,1 % и снижению удельного расхода условного топлива с 23,8 до 17,0 кг у.т./т транспортируемой стали, т.е. в 1,4 раза.

Характерно, что увеличение температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С для всех исследуемых вариантов приводит к снижению параметра  $B_{уд}$  примерно в 1,3 раза. Уменьшение величины зазора  $b$  с 250 до 50 мм для ковшей различной емкости оказывает различный эффект. В частности, для 90-т ковшей снижение  $B_{уд}$  составляет порядка 1,2 раза, а для 480-т – всего 1,08 раза. Из полученных данных следует, что стенды для разогрева 90-т ковшей по сравнению со стендами разогрева 480-т ковшей имеют фактически в 1,5 – 1,6 раза больший удельный расход условного топлива и соответственно менее экономичны. По удельным расходам условного топлива нагрев 480-т ковша на стенде без подогрева воздуха с зазором  $b = 250$  мм примерно аналогичен разогреву 90-т ковша на стенде с подогревом воздуха до температуры 400 °С и величиной  $b = 50$  мм. Для установления причин этого явления проведем анализ взаимосвязи геометрических характеристик ковша, тепловых параметров и массы транспортируемой стали. Из данных, представленных в табл. 4.3, видно, что для ковшей меньшей емкости характерны более высокие потери тепла теплопроводностью через кладку, достигающие для 90-т ковшей 6,5 – 8,8 %, а для 480-т – 2,2 – 2,7 %, и меньший расход тепла на аккумуляцию тепла футеровкой, который составляет 36,5 – 49,0 и 46,7 – 55,9 % соответственно. Из табл. 4.2 видно, что для ковшей малой емкости характерна более высокая температура кожуха, как следствие – более высокие теплотери теплопроводностью. В то же время важное значение имеют объем (или масса, влияющая на теплосодержание) футеровки и площадь поверхности кожуха, предопределяющая теплотери в окружающую среду. На рис. 4.3 *а, б* представлены зависимости удельных площади  $S_{уд}$ , м<sup>2</sup>/т, поверхности кожуха и объема  $V_{уд}$ , м<sup>3</sup>/т, т.е. отношения площади поверхности кожуха и объема футеровки к номинальной емкости ковша.

Видно, что для ковшей исследуемых емкостей удельная площадь снижается в два раза, а удельный объем почти не изменяется. В связи с этим, если не принимать во внимание различие теплового состояния футеровок ковшей различной емкости, меньшие значения  $B_{уд}$  для ковшей большей емкости связаны в первую очередь с меньшей удельной площадью поверхности кожуха.

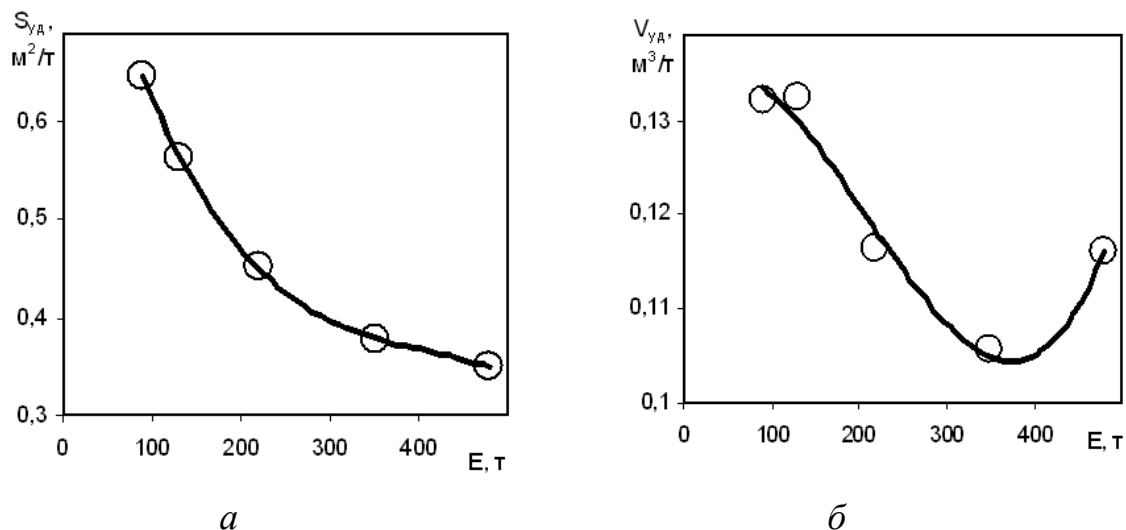


Рисунок 4.3 – Изменение удельных площади поверхности кожуха (а) и объема футеровки (б) в зависимости от емкости ковша

Полученные данные хорошо согласуются с теорией и практикой конструирования и эксплуатации промышленных печей, которые показывают, что с увеличением емкости, производительности или садки печей удельные расходы топлива на единицу обрабатываемого материала снижаются.

#### 4.4 Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей

Температурные режимы разогрева футеровок имеют ряд ограничений на различные параметры, вызванные теплофизическими и физико-химическими свойствами разогреваемого материала, конструктивными особенностями стенда, тепловой мощностью горелочного устройства. В частности, максимальная ско-

рость разогрева футеровки, как правило, лимитирована допустимыми скоростями разогрева огнеупора из условий отсутствия трещинообразования от температурных или фазовых напряжений и тепловой мощностью стенда. Низкая скорость разогрева увеличивает его продолжительность, снижает производительность технологической операции, приводит к увеличению парка ковшей. Для углеродсодержащих огнеупоров рабочего слоя, получивших широкое распространение в сталеплавильном производстве, низкая скорость нагрева и более высокая его продолжительность приводят к росту времени нахождения поверхности футеровки при температурах более 600 – 700 °С, а, соответственно, к росту глубины обезуглероженного слоя и повышенному износу огнеупоров.

С применением разработанной математической модели проведены исследование влияния температурного режима разогрева футеровки на тепловую эффективность стенда и изучение динамики показателей теплового состояния ковша в процессе разогрева. В качестве исходных данных принимали конструкцию футеровки, соответствующую сталеразливочным ковшам емкостью ( $E$ ) 90, 350 и 480 т (таб. 4.1). Параметры футеровки и состав природного газа, используемого для отопления стенда, приняты аналогичными, представленным в разделе 4.3 диссертации. Принимали, что в рассматриваемой конструкции стенда имеется зазор 250 мм между крышкой и ковшом. Подогрев воздуха отсутствует. При проведении многовариантных расчетов принимали режим разогрева с постоянной скоростью ( $\Theta$ ) 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150 и 200 °С/ч (температура среды изменялась по линейному закону) и продолжительностью ( $\tau$ ) разогрева 40, 30, 24, 20, 15, 12, 8 и 6 ч. Конечная температура нагрева поверхности футеровки составляла 1200 °С. В табл. 4.4 и на рис. 4.4 и 4.5 представлены результаты исследований (где  $t_{cp}$ ,  $t_{p-a}$ ,  $t_{кож}$  – температуры греющей среды, на стыке рабочего и арматурного слоев, кожуха ковша;  $Q$  – объем природного газа, затраченного на разогрев;  $B_{max}$  – максимальный расход топлива за период разогрева;  $B_{уд}$  – удельный расход условного топлива на тонну стали; КПД – тепловой коэффициент полезного действия стенда;  $q_{akk}$ ,  $q_{тер}$  и  $q_d$  – тепло, аккумулированное кладкой, уходящее с дымом и теряемое теплопроводностью через футеровку в окружающую среду).

Анализ полученных результатов показывает наличие характерной зависимости КПД от скорости разогрева: зависимость имеет экстремальный характер, причем для ковшей различной емкости экстремум имеет различное значение. При увеличении скорости разогрева от 30 до 80 – 150 °С/ч (в зависимости от емкости ковша) (рис. 4.4) наблюдается рост КПД, далее, при более высоких скоростях разогрева КПД снижается.

Таблица 4.4 – Показатели тепловой работы стендов при различных режимах разогрева футеровок

$E, \text{ Т}$	$\theta, \text{ }^\circ\text{С/ч}$	$\tau, \text{ ч}$	$t_{\text{ср}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$t_{\text{р-а}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$t_{\text{кож}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$Q, \text{ м}^3$	$B_{\text{макс}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$B_{\text{уд}}, \text{ кг у.т./т}$	КПД, %	$q_{\text{акк}}, \text{ \%}$	$q_d, \text{ \%}$	$q_{\text{теп}}, \text{ \%}$
90	30	40	1239	1110	341	3655	207	51,8	29,4	28,9	40,5	11,0
90	40	30	1245	1088	326	3111	226	44,1	33,7	33,2	40,9	8,4
90	50	24	1257	1066	309	2799	247	39,6	36,7	36,1	41,4	6,5
90	60	20	1268	1038	290	2564	267	36,3	38,9	38,3	41,9	5,1
90	80	15	1290	991	256	2299	312	32,6	41,3	40,7	43,3	3,3
90	100	12	1310	971	224	2132	362	30,2	42,3	41,8	44,4	2,2
90	150	8	1355	851	163	1905	496	27,0	42,5	42,0	47,4	1,0
90	200	6	1394	776	123	1776	634	25,2	41,6	41,2	49,8	0,5
350	30	40	1234	1071	201	7546	354	27,5	41,4	40,6	39,0	5,2
350	40	30	1245	1030	180	6726	409	24,5	44,6	43,7	39,5	3,3
350	50	24	1257	995	161	6274	470	22,9	46,1	45,3	40,3	2,3
350	60	20	1268	960	142	5937	532	21,6	46,9	46,1	41,1	1,5
350	80	15	1290	896	111	5474	652	19,9	47,3	46,6	42,6	0,8
350	100	12	1310	838	87	5140	782	18,7	47,1	46,5	43,8	0,4
350	150	8	1355	724	53	4604	1102	16,8	45,8	45,3	46,5	0,1
350	200	6	1394	639	38	4277	1427	15,6	44,3	43,9	48,7	0
480	30	40	1240	1018	180	10270	461	27,3	44,6	43,8	39,1	3,9
480	40	30	1255	969	157	9364	541	24,9	46,6	45,8	40,1	2,4
480	50	24	1263	918	134	8639	636	22,9	47,7	47	40,8	1,5
480	60	20	1276	875	114	8185	728	21,7	48,0	47,4	41,6	1,0
480	80	15	1300	799	85	7529	899	20,0	47,9	47,3	43,2	0,5
480	100	12	1310	734	65	7027	1074	18,7	47,4	46,9	44,4	0,2
480	150	8	1362	608	39	6193	1488	16,4	46,0	45,5	46,9	0,1
480	200	6	1397	519	29	5690	1889	15,1	44,5	44,1	48,9	0

Такая зависимость КПД от скорости разогрева объясняется особенностями процессов внешнего и внутреннего теплообмена. При медленном и продолжительном разогреве температура среды значительно ниже, чем при скоростном форсированном. В частности, при разогреве со скоростью 30 °С/ч в течении 40 ч температура среды не превышает 1240 °С, а при скорости 200 °С/ч и времени всего 6 ч для достижения необходимой температуры поверхности футеровки необхо-

димо иметь в конце разогрева температуру среды 1397 °С. Увеличение скорости разогрева приводит к ухудшению прогрева кладки и к меньшим значениям температур кожуха, а соответственно, к потерям тепла теплопроводностью в окружающую среду. Увеличение температуры греющей среды приводит к монотонному росту потерь тепла с уходящим дымом (рис. 4.5).

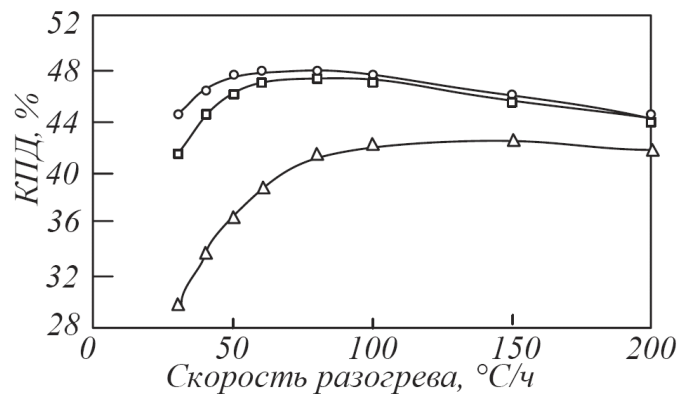


Рисунок 4.4 – Зависимость КПД стенда от скорости разогрева при емкости ковша 90 (Δ), 350 (□) и 480 т (○)

Таким образом, увеличение количества аккумулированного кладкой тепла сопровождается ростом потерь тепла через футеровку. Соответственно, взаимное влияние этих статей теплового баланса предопределяет установленный характер влияния скорости разогрева на КПД стенда.

Рассмотренные параметры разогрева исследованы теоретически. На практике имеется целый ряд ограничений (в таблице возможные значения параметров выделены жирным шрифтом). Например, по условиям отсутствия трещинообразования скорость разогрева алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров на углеродной связке не должна превышать 60 – 100 °С/ч; при первом разогреве футеровки температура на стыке рабочего и арматурного слоев должна составлять не менее 800 °С, температура кожуха не менее 100 °С и не более 400 °С; расходы топлива горелочных устройств стендов обычно не превышают 500 м³/ч. На рис. 4.6 представлен температурный режим разогрева футеровки ковша емкостью 350 т с постоянной скоростью 50 °С/ч. На рис. 4.7 и 4.8 представлена динамика расхода тепла при реализации температурного режима, представленного на рис. 4.6.

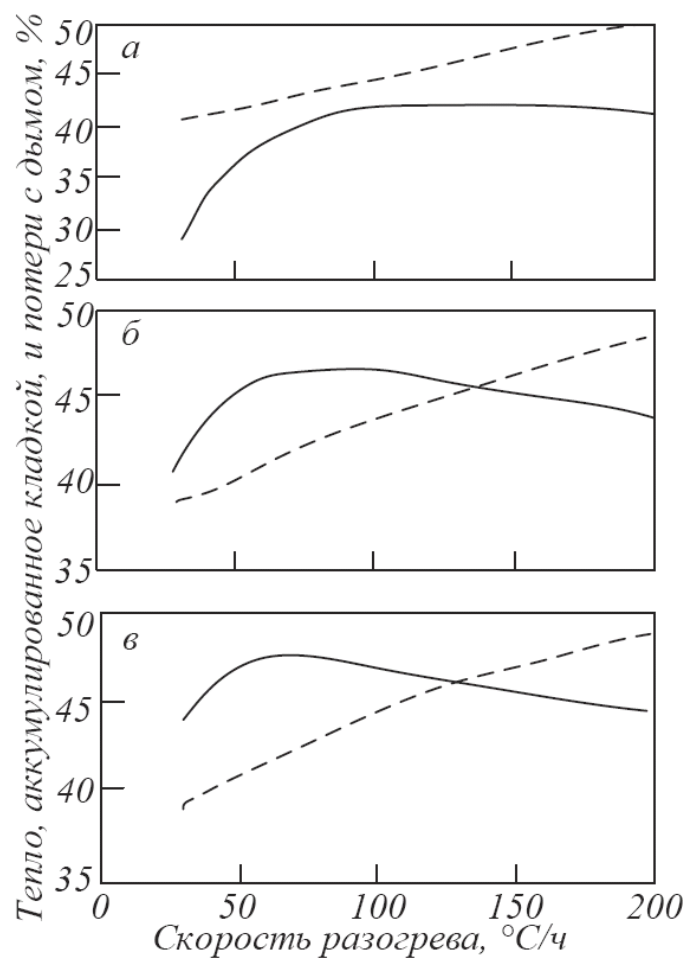


Рисунок 4.5 – Зависимости количества тепла, аккумулированного футеровкой (—), и потерь тепла с дымом (---) от скорости разогрева футеровки для ковшей емкостью 90 т (а), 350 т (б) и 480 т (в)

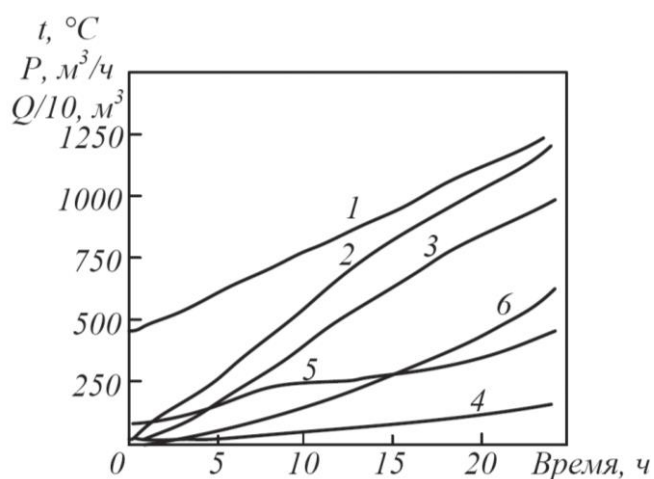


Рисунок 4.6 – Температурный режим разогрева ковша: 1 – 4 – температуры греющей среды ( $t_{\text{ср}}$ ), поверхности рабочего слоя, на стыке рабочего и арматурного слоев ( $t_{\text{р-а}}$ ) и кожуха ( $t_{\text{кож}}$ ) соответственно; 5 – расход  $P$  природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ; 6 –  $Q$ ,  $\text{м}^3$



Анализ полученных результатов (рис. 4.6 – 4.8) показывает, что коэффициент полезного действия стенда в процессе разогрева фактически монотонно снижается с 72 до 46 %. Основное влияние на КПД оказывают две расходные статьи: тепло, аккумулированное кладкой, и потери тепла с уходящими продуктами сгорания.

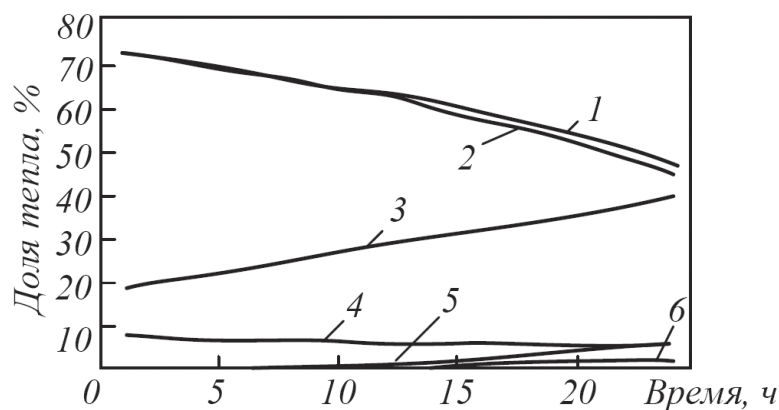


Рисунок 4.7 – Динамика расхода тепла: 1 – коэффициент полезного действия; 2 – тепло, аккумулированное футеровкой; 3 – потери тепла с уходящими продуктами сгорания; 4 – неучтенные потери; 5 – потери тепла излучением через технологические отверстия и зазоры; 6 – потери тепла теплопроводностью через кладку

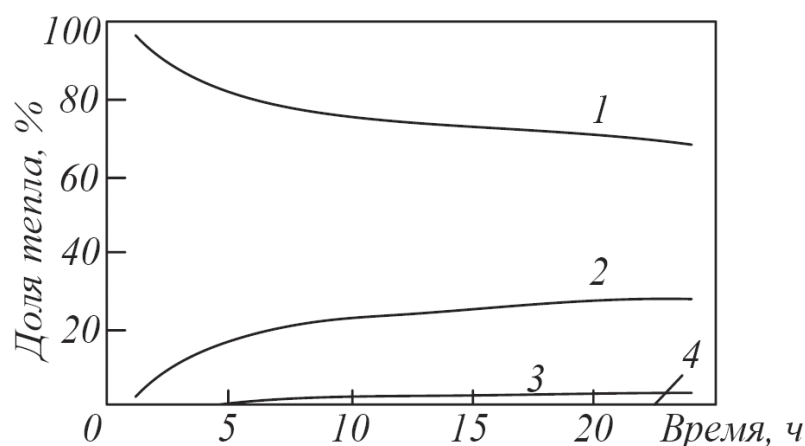


Рисунок 4.8 – Изменение количества тепла, аккумулированного футеровкой и кожухом ковша: 1, 2, 4 – тепло, аккумулированное рабочим, арматурным и теплоизоляционным слоем футеровки соответственно; 3 – тепло, аккумулируемое кожухом ковша



В начале разогрева футеровка интенсивно аккумулирует тепло, температура уходящих продуктов сгорания и их расход относительно невелики. С увеличением времени разогрева рост температуры греющей среды и температуры футеровки сопровождается опережающим увеличением потерь тепла с уходящими продуктами сгорания. При этом тепловая волна, дошедшая до кожуха, приводит к росту тепловых потерь в окружающую среду теплопроводностью. С ростом температуры греющей среды возрастают потери через технологические отверстия и зазоры. Все эти факторы приводят к снижению КПД стенда и к росту расхода топлива. В частности, расход топлива в процессе разогрева в течение 24 ч увеличивается почти в 5,5 раз (с 86 до 470 м<sup>3</sup>/ч).

#### **4.5 Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стендов высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей**

С применением математической модели проведено исследование влияния обогащения дутья кислородом на технико-экономические показатели работы стенда и качество нагрева футеровки.

Многовариантные расчеты осуществляли на примере разогрева 350-т сталеразливочного ковша, футеровка которого состояла из четырех слоев: рабочего толщиной 200 мм, выполненного из алюмопериклазоуглеродистого огнеупора марки APC-75Н1; арматурного толщиной 100 мм из огнеупора марки МКРКП-45 (между рабочим и арматурным слоями находится буферная засыпка марки ВГБМ-80 толщиной 25 мм); теплоизоляционного слоя толщиной 10 мм, выполненного из материала МКРКГ-400; стальной брони ковша толщиной 40 мм. Стенд оборудован водоохлаждаемой горелкой, в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение. Химический состав природного газа, используемого для отопления стенда, представлен в разделе 4.3.

В качестве основного расчетного режима приняли так же разогрев с постоянной, максимально допустимой по условиям трещинообразования скоростью

увеличения температуры поверхности рабочего слоя. Время  $\tau$  разогрева предварительно высушенной футеровки приняли 24 ч. При проведении расчетов при прочих равных условиях варьировали коэффициент  $\alpha$  расхода окислителя от 1,025 до 1,500 и содержание кислорода в нем от 21 до 50 %.

Качество нагрева футеровки оценивали по параметрам:

- температура  $t_{п.кон}$  поверхности футеровки в конце разогрева должна составлять  $1200 \pm 20$  °С;
- температура  $t_{р-а}$  на стыке рабочего и арматурного слоев – не менее 800 °С;
- скорость увеличения температуры поверхности рабочего слоя – не более 100 °С/ч,
- температура  $t_{кож}$  кожуха ковша – не более 425 °С.

В табл. 4.5 представлены результаты расчетов для 25 различных режимов разогрева. При оценке теплотехнических характеристик и параметров работы стенда обогащение дутья кислородом приводит к однозначному их улучшению, что соответствует результатам исследований, выполненных для различных типов нагревательных печей [77]. Обогащение дутья кислородом уменьшает объем и расход продуктов сгорания, повышает калориметрическую температуру  $t_k$  горения топлива, содержание трехатомных газов в продуктах сгорания. Последнее увеличивает степень черноты газов, приводит к интенсификации теплообменных процессов, повышает коэффициент полезного действия стенда, снижает удельный ( $B$ ) и общий ( $Q$ ) расходы топлива на разогрев. Однако необходимо учитывать, что многие топливо-кислородные или топливо-воздухо-кислородные горелки (например, типа Pyretron) являются водоохлаждаемыми. При этом потери тепла с охлаждающей водой могут достигать 10 %. Это в ряде случаев фактически полностью нивелирует положительный эффект снижения расхода топлива и повышения тепловой эффективности стенда от обогащения дутья кислородом.

Повышение коэффициента расхода окислителя более 1,05 практикуется при разогреве ковшей рядом предприятий в целях устранения недожога, снижения температуры продуктов сгорания и скорости разогрева. Также оно является следствием подсосов атмосферного воздуха в полость ковша. Это оказывает обратное

влияние на теплотехнические показатели работы стенов. Как видно из табл. 4.5, наиболее эффективным с теплотехнической точки зрения является режим 5 при содержании кислорода в окислителе 50 % и коэффициенте расхода последнего 1,025. КПД рассматриваемого случая достигает 54,9 %, а общий расход топлива на разогрев составляет 4811 м<sup>3</sup>.

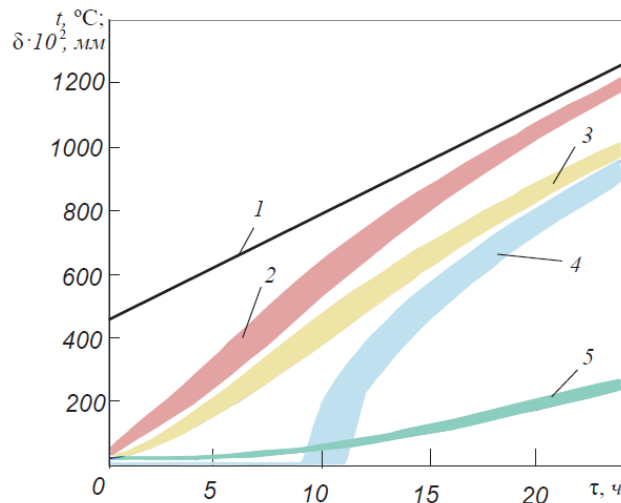
Таблица 4.5 – Результаты расчетов для различных режимов разогрева сталеразливочных ковшей

Ре- жим	Состав окисли- теля, %		$L_{в}/L_{к}$ , М <sup>3</sup> /М <sup>3</sup>	$V_{п.с.}$ , М <sup>3</sup> /М <sup>3</sup>	Состав п.с., %				$t_{к}$ , °С	$t_{п.кон.}$ , °С	$t_{р-а}$ , °С	$t_{кож.}$ , °С	$\delta_{об.}$ , мм	КПД, %	$B_{ср.}$ , М <sup>3</sup> /ч	$Q_{г.}$ , М <sup>3</sup>	$Q_{к}$ , М <sup>3</sup>	$Q_{в}$ , М <sup>3</sup>
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>										
При $\alpha = 1,025$																		
1	79	21	10,4/0	11,6	9,2	19,3	71,0	0,5	1771	1193	989	248	9,2	40,2	266,2	6389	0	66444
2	75	25	8,2/0,4	9,9	10,8	22,3	66,4	0,5	1992	1198	994	252	9,3	44,4	242,5	5820	2328	47724
3	70	30	6,4/0,8	8,4	12,7	25,9	60,8	0,6	2237	1202	999	255	9,4	48,0	225,9	5422	4337	34698
4	60	40	4,1/1,3	6,5	16,3	32,7	50,2	0,8	2647	1205	1006	260	9,5	52,4	208,9	5014	6518	20556
5	50	50	2,7/1,6	5,4	19,7	38,9	40,5	0,9	2975	1209	1011	263	9,6	54,9	200,4	4810	7695	12986
При $\alpha = 1,05$																		
6	79	21	10,6/0	11,8	9,1	18,9	71,1	0,9	1741	1192	988	248	9,2	39,6	270,4	6490	0	68841
7	75	25	8,4/0,5	10,1	10,6	21,9	66,5	1,0	1960	1197	993	251	9,3	43,9	245,3	5887	2944	49453
8	70	30	6,6/0,8	8,6	12,5	25,4	60,9	1,2	2204	1201	999	255	9,3	47,6	227,8	5467	4374	36084
9	60	40	4,2/1,3	6,7	16,0	32,1	50,3	1,6	2611	1207	1006	260	9,5	52,0	210,0	5040	6552	21168
10	50	50	2,8/1,6	5,5	19,3	38,2	40,6	1,9	2939	1208	1010	263	9,6	54,6	201,3	4831	7730	13527
При $\alpha = 1,1$																		
11	79	21	11,1/0	12,3	8,7	18,2	71,4	1,7	1649	1191	986	247	9,1	38,2	279,4	6706	0	74432
12	75	25	8,9/0,5	10,5	10,2	21,0	66,8	2,0	1899	1196	992	250	9,2	42,8	251,1	6026	3013	53635
13	70	30	6,9/0,9	8,9	12,0	24,4	61,3	2,3	2140	1200	997	254	9,3	46,7	231,7	5561	5005	38370
14	60	40	4,4/1,4	6,9	15,4	30,9	50,7	3,0	2543	1206	1005	259	9,5	51,4	212,4	5098	7137	22429
15	50	50	3,0/1,7	5,8	18,6	36,9	40,9	3,6	2869	1207	1010	262	9,5	54,1	202,9	4870	8278	14609
При $\alpha = 1,2$																		
16	79	21	12,1/0	13,4	8,0	17,0	71,9	3,1	1583	1188	983	245	9,1	35,5	299,8	7195	0	87062
17	75	25	9,7/0,5	11,4	9,4	19,6	67,3	3,7	1790	1193	989	249	9,2	40,6	263,8	6331	3166	61413
18	70	30	7,5/1,0	9,6	11,1	22,8	61,8	4,3	2022	1198	995	252	9,3	44,9	240,1	5762	5762	43218
19	60	40	4,8/1,5	7,5	14,3	28,8	51,3	5,6	2417	1205	1003	257	9,4	50,1	217,3	5215	7823	25033
20	50	50	3,2/1,9	6,2	17,3	34,5	41,5	6,7	2739	1208	1008	261	9,5	53,1	206,2	4949	9403	15836
При $\alpha = 1,5$																		
21	79	21	15,2/0	16,4	6,5	14,1	73,1	6,3	1341	1179	975	240	8,9	26,7	394,7	9473	0	143987
22	75	25	12,1/0,6	13,9	7,7	16,3	68,6	7,4	1525	1186	982	244	9,1	33,8	314,5	7548	4529	91331
23	70	30	9,3/1,3	11,8	9,1	18,9	63,2	8,8	1737	1192	988	248	9,2	39,5	271,2	6509	8461	60532
24	60	40	6,0/1,9	9,1	11,8	24,0	52,8	11,4	2104	1200	997	254	9,3	46,2	234,1	5618	10675	33710
25	50	50	4,0/2,3	7,5	14,3	28,9	42,9	13,9	2412	1205	1003	257	9,4	50,1	217,6	5222	12012	20890

Пр и м е ч а н и е.  $L_v$  и  $L_k$  – удельный расход воздуха и кислорода на 1 м<sup>3</sup> сжигаемого газа;  $Q_v$  – расход воздуха.

Наиболее затратным является режим 21, соответствующий использованию в качестве окислителя воздуха, подаваемого на горение с величиной  $\alpha = 1,5$ . При этом режиме КПД стенов составляет всего 26,7 %, а расход топлива почти в два раза больше по сравнению с режимом 5 и составляет 9474 м<sup>3</sup>. Характерно, что все исследованные режимы обеспечивают примерно одинаковое качество разогрева футеровки как по температурам поверхности футеровки, стыка рабочего и арматурного слоев, кожуха, так и по глубине  $\delta_{об}$  обезуглероженного слоя, который для режима 21 составля-

ет 8,9 мм, а для режима 5 – 9,6 мм. Изменение различных параметров во времени для рассматриваемых случаев представлено на рис. 4.9.



- 1 – температура греющей среды; 2 – температура поверхности футеровки;  
 3 – температура на стыке рабочего и арматурного слоев;  
 4 – глубина обезуглероженного слоя; 5 – температура кожуха

Рисунок 4.9 – Температурный режим разогрева

На рис. 4.10 приведены изменения расхода газа во времени при различных значениях  $\alpha$  и использовании в качестве окислителя воздуха. После 10 – 12 ч от начала разогрева начинается процесс обезуглероживания, имеющий экзотермический эффект и являющийся приходной статьей теплового баланса, следовательно происходит снижение расхода топлива.

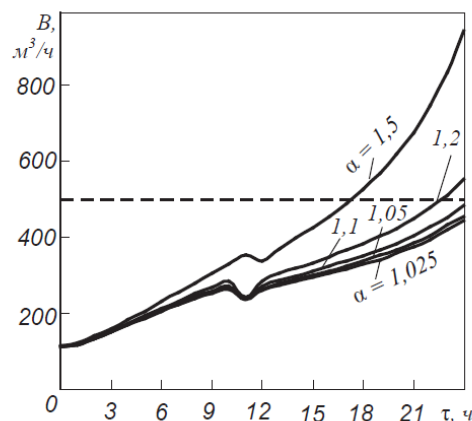


Рисунок 4.10 – Изменение расхода газа во времени при различных коэффициентах расхода окислителя и использовании в качестве него воздуха

Большинство эксплуатируемых в настоящее время станков обеспечивают расход топлива не более 450 – 500 м<sup>3</sup>/ч (рис. 4.10, штриховая линия). Без обогащения дутья кислородом практически обеспечить заданный (с постоянной скоростью увеличения температуры поверхности футеровки) режим разогрева можно только при коэффициентах расхода окислителя не более 1,1. Повышение величины  $\alpha$  сверх этого значения повлечет за собой либо увеличение продолжительности нагрева, либо недогрев до заданной температуры футеровки.

В современных условиях функционирования металлургических предприятий весьма важен экономический фактор эффективности применения кислорода. В связи с этим проведены расчеты затрат  $Z$ , руб, на разогрев одного ковша по следующему соотношению:

$$Z = Q_{\text{г}}\Pi_{\text{г}} + Q_{\text{к}}\Pi_{\text{к}} + Q_{\text{эл.в}}\tau\Pi_{\text{эл}} + Q_{\text{эл.д}}\tau\Pi_{\text{эл}}, \quad (4.59)$$

где  $Q_{\text{г}}$  и  $Q_{\text{к}}$  – общие расходы газа и кислорода на разогрев, м<sup>3</sup>;  $\Pi_{\text{г}}$  и  $\Pi_{\text{к}}$  – цена 1 м<sup>3</sup> газа и кислорода соответственно, руб;  $Q_{\text{эл.в}}$  и  $Q_{\text{эл.д}}$  – мощность вентилятора и дымососа соответственно, кВт;  $\Pi_{\text{эл}}$  – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

При этом учитывали, что двигатель вентилятора, подающего воздух на горелку станка, и дымосос работают с постоянными расходами электроэнергии, не зависящими от расхода воздуха и продуктов сгорания. Соответственно третье и четвертое слагаемые в выражении (4.59) являются постоянными величинами. Если в конструкции станка дымосос отсутствует, а продукты сгорания удаляются через зазор между крышкой станка и ковшом, то четвертое слагаемое равно нулю.

Поскольку цены на энергоносители на различных предприятиях не одинаковы, то провели оценку затрат на разогрев в относительных величинах, принимая соотношения цены единицы газа и кислорода, равные 1:10, 1:5, 1:1, 5:1; 10:1. В табл. 4.5 представлены абсолютные расходы энергоносителей, а на рис. 4.11 – затраты в относительных единицах. Анализ проведенных расчетов показывает, что применение кислорода снижает стоимость нагрева только в том случае, если цена 1 м<sup>3</sup> газа в 3 – 4 раза больше, чем цена 1 м<sup>3</sup> кислорода.

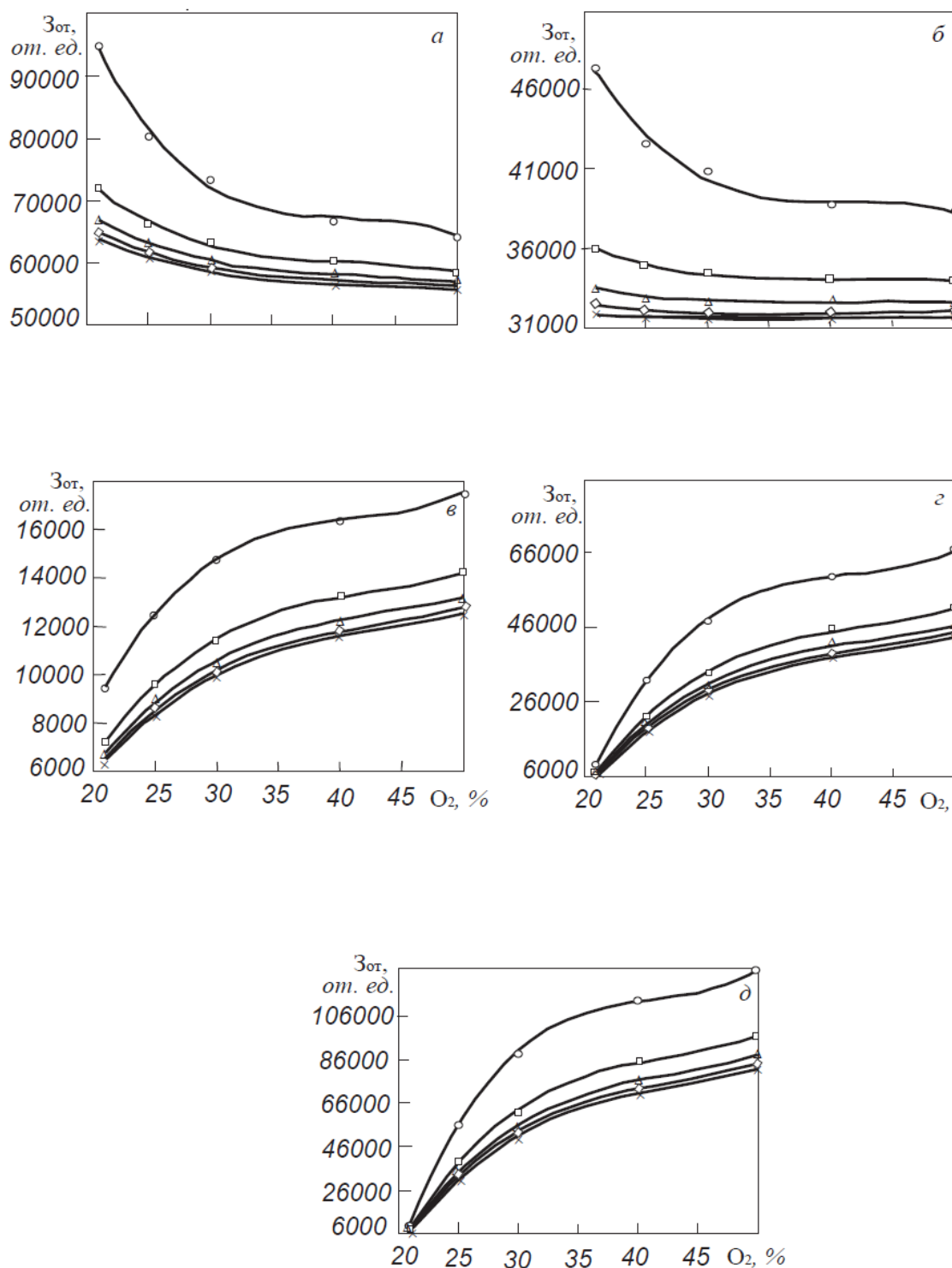


Рисунок 4.11 – Зависимость относительных затрат  $Z_{от}$  на разогрев от содержания кислорода в окислителе при коэффициентах его расхода 1,025 (×); 1,05 (◇); 1,1 (Δ); 1,2 (□); 1,5 (○): *a* – 10:1; *б* – 5:1; *в* – 1:1; *г* – 1:5; *д* – 1:10

Дополнительно провели расчет влияния обогащения дутья кислородом и коэффициента расхода окислителя на затраты для разогрева по фактическим ценам энергоносителей (природный газ – 3,64 руб/м<sup>3</sup>; кислород – 1,91 руб/м<sup>3</sup>; электроэнергия – 1,44 руб/(кВт·ч)) одного из российских металлургических предприятий. Результаты представлены на рис. 4.12, из которого видно, что при таких ценах на энергоносители обогащение дутья кислородом увеличивает стоимость разогрева. Следовательно, его целесообразно применять только в том случае, если необходимо достижение определенных параметров технологии, например заданной температуры разогрева при недостаточной тепловой мощности стенда. При этом подача кислорода может осуществляться только на завершающей стадии разогрева.

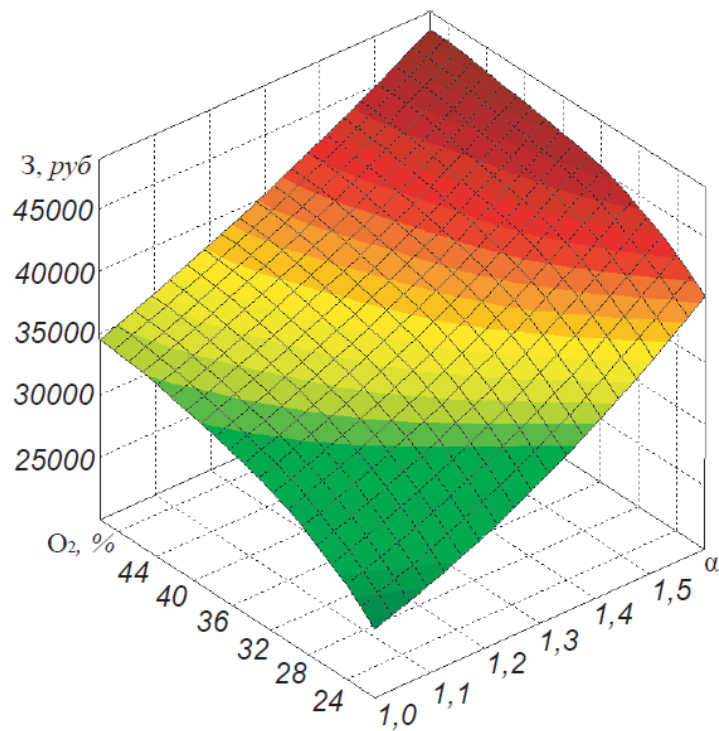


Рисунок 4.12 – Зависимость абсолютных затрат на разогрев от содержания кислорода в окислителе и коэффициента его расхода

#### **4.6 Исследование эффективности совместного использования теплоизолированных крышек, подогрева и обогащения кислородом окислителя при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей**

С применением математической модели проведено исследование эффективности совместного использования различных энергосберегающих мероприятий. Многовариантные расчеты проводили для сталеразливочного ковша емкостью 350 т, конструкция футеровки, состав природного газа и температурный режим разогрева использованы аналогичными как и в предыдущих разделах. Исследуемые варианты нагрева и их основные параметры представлены в табл. 4.6.

Анализ полученных результатов показывает, что наименее экономичным, как и следовало ожидать, является нагрев 1. При отсутствии теплоизолированной крышки, подогрева воздуха и обогащения дутья кислородом КПД стенов составил 21,7 %, средний расход топлива на разогрев равен  $496 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а общий расход топлива –  $11902 \text{ м}^3$ . При максимальных расходах топлива не более  $450 - 500 \text{ м}^3/\text{ч}$  (на рис. 4.13 показан штриховой линией) на эксплуатируемых в настоящее время стенов, с постоянной скоростью увеличения температуры поверхности футеровки, разогрев по такому варианту возможен только первые 13 – 14 ч, при этом температура поверхности составит порядка  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 4.13). Для дальнейшего сохранения постоянной скорости разогрева расхода топлива  $B$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$  и тепловой мощности стенов будет недостаточно. Потери тепла излучением через открытое пространство ковша достигают 26,4 %. Подогрев воздуха до температуры  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  (нагрева 5) повышает КПД до 28,1 % и несколько снижает расход топлива, однако это обеспечит нагрев футеровки с постоянной скоростью только до  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Применение герметичной теплоизолированной крышки является эффективным энергосберегающим мероприятием.

Для нагрева 6 даже при отсутствии подогрева воздуха КПД возрастает до 51,2 %, средний расход топлива снижается до  $209 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а общий расход – до  $5006 \text{ м}^3$ , т.е. в 2,4 раза меньше, чем при нагреве 1.



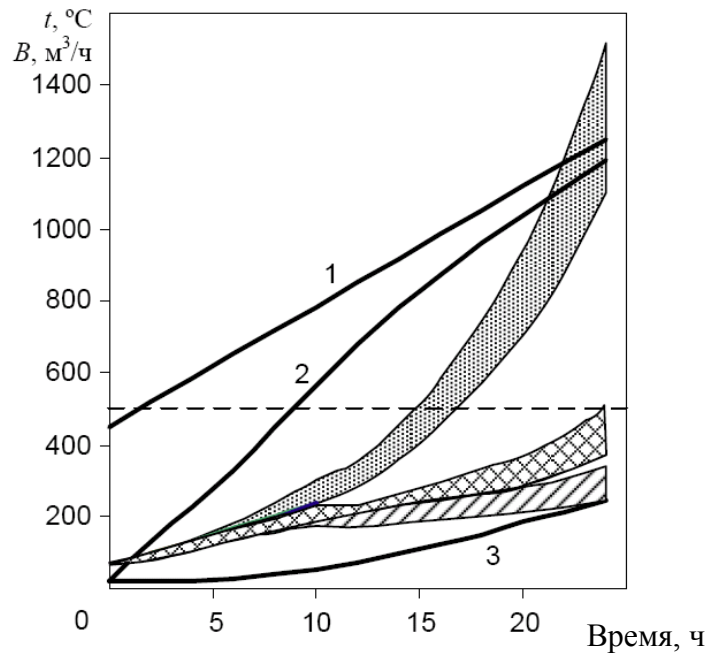
Таблица 4.6 – Параметры и характеристики исследуемых вариантов разогрева

Нагрев	Состав окислителя, %		h, мм	t <sub>ок</sub> , °C	КПД, %	Вср, м <sup>3</sup> /ч	G <sub>г</sub> /G <sub>к</sub> , м <sup>3</sup>	Статьи теплового баланса, %								
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>						Приход			Расход					
								Q <sub>тх</sub>	Q <sub>ок</sub>	Q <sub>об<sup>х</sup></sub>	Q <sub>акк-ф</sub>	Q <sub>д</sub>	Q <sub>теп</sub>	Q <sub>изл</sub>	Q <sub>вод</sub>	ΣQ
1	79	21	б/к	10	21,7	496	11902/0	98,9	0	1,1	21,4	44,5	1,8	26,4	0	5,9
2				100	23,0	465	11164/0	95,1	3,7	1,2	22,1	42,9	1,8	27,2	0	6,0
3				200	24,6	434	10412/0	91,6	7,2	1,2	22,7	41,2	1,9	28,0	0	6,2
4				300	26,3	405	9730/0	88,1	10,7	1,2	23,4	39,5	1,9	28,8	0	6,4
5				400	28,1	380	9113/0	84,7	14,0	1,3	24,0	38,0	2,0	29,6	0	6,4
6	79	21	г/к	10	51,2	209	5006/0	97,3	0	2,7	50,1	39,4	4,1	0	0	6,4
7				100	54,3	197	4717/0	93,7	3,6	2,7	51,4	37,9	4,2	0	0	6,5
8				200	58,0	184	4420/0	90,1	7,1	2,8	52,7	36,4	4,3	0	0	6,6
9				300	61,8	173	4149/0	86,6	10,5	2,9	54,0	34,9	4,4	0	0	6,7
10				400	65,7	163	3901/0	83,4	13,7	2,9	55,2	33,5	4,5	0	0	6,8
11	79	21	50	10	50,0	213	5123/0	97,4	0	2,6	49,0	39,6	4,0	1,0	0	6,4
12				100	53,1	201	4826/0	93,7	3,6	2,7	50,2	38,1	4,1	1,0	0	6,6
13				200	56,7	188	4522/0	90,2	7,1	2,7	51,5	36,5	4,2	1,1	0	6,7
14				300	60,4	177	4243/0	86,7	10,5	2,8	52,8	35,1	4,3	1,1	0	6,7
15				400	64,2	166	3989/0	83,4	13,7	2,9	54,0	33,6	4,4	1,1	0	6,9
16	79	21	150	10	47,3	226	5422/0	97,5	0	2,5	46,4	40,0	3,8	3,4	0	6,4
17				100	50,2	213	5106/0	93,9	3,6	2,5	47,5	38,6	3,9	3,5	0	6,5
18				200	53,6	199	4782/0	90,3	7,1	2,6	48,8	37,0	4,0	3,6	0	6,6
19				300	57,1	187	4486/0	86,8	10,5	2,7	50,0	35,5	4,1	3,7	0	6,7
20				400	60,8	176	4216/0	83,6	13,7	2,7	51,2	34,0	4,2	3,8	0	6,8
21	79	21	300	10	42,6	251	6011/0	97,8	0	2,2	41,9	40,8	3,4	7,5	0	6,4
22				100	45,3	236	5657/0	94,1	3,6	2,3	43,0	39,3	3,5	7,7	0	6,5
23				200	48,4	221	5294/0	90,6	7,1	2,3	44,2	37,7	3,6	7,9	0	6,6
24				300	51,6	207	4962/0	87,1	10,5	2,4	45,3	36,2	3,7	8,1	0	6,7
25				400	55,0	194	4661/0	83,7	13,8	2,5	46,4	34,7	3,8	8,3	0	6,8
26	75	25	150	10	42,8	251	6026/3013	97,8	0	2,2	42,1	32,7	3,5	3,2	11,4	7,1
27	70	30			46,7	231	5560/5005	97,6	0	2,4	45,9	26,8	3,9	3,6	12,3	7,5
28	60	40			51,4	212	5097/7137	97,3	0	2,7	50,4	19,5	4,5	4,0	13,4	8,2
29	50	50			54,1	203	4870/8278	97,1	0	2,9	53,0	15,3	4,8	4,3	14,0	8,6
30	50	50	г/к	400	62,4	176	4225/7182	90,6	6,3	3,1	57,1	14,0	5,2	0	15,1	8,6
31	50	50	г/к	400	78,2	141	3373/5754	89,9	6,3	3,8	70,9	14,0	6,4	0	0	8,7

Примечание: б/к – без крышки; г/к – с герметичной теплоизолированной крышкой; Q<sub>тх</sub> – химическое тепло топлива; Q<sub>ок</sub> – физическое тепло окислителя; Q<sub>об<sup>х</sup></sub> – химическое тепло обезуглероживания огнеупора; Q<sub>ак.ф</sub> – тепло, аккумулируемое футеровкой; Q<sub>д</sub> – потери тепла с уходящим дымом; Q<sub>теп</sub> – потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду; Q<sub>изл</sub> – потери тепла излучением через зазор между крышкой станда и ковшом; Q<sub>вод</sub> – потери тепла с охлаждающей водой; ΣQ – сумма остальных расходных статей (неучтенные потери), включающая потери тепла в результате химического недожога и пр.

Основной энергосберегающий эффект достигается за счет ликвидации расходной статьи Q<sub>изл</sub>. Применение конструкции крышки, представленной на рис. 1.7, б, также достаточно эффективно, однако потенциал энергосбережения зависит от величины зазора между крышкой и ковшом. Так при величине h = 50 мм

потери тепла излучением составляют порядка 1 %, а при  $h = 300$  мм – возрастают до 7 – 8 %. Для нагрева 21 без подогрева воздуха и при величине  $h = 300$  мм КПД составляет 42,6 %, средний расход топлива равен  $251 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а общий расход –  $6011 \text{ м}^3$ , это почти в 2 раза меньше чем при варианте 1. При такой конструкции стенда тепловой мощности будет достаточно, чтобы разогреть футеровку до  $1200^\circ\text{C}$  с постоянной скоростью (рис. 4.13).



1 – температура греющей среды; 2 – температура поверхности футеровки;  
3 – температура кожуха; области изменений расходов газа во времени, соответствующих нагревам – 1 – 5; – 6 – 10; – 21 – 25

Рисунок 4.13 – Температурный режим и изменение расхода газа во времени для различных вариантов разогрева

Подогрев воздуха способствует повышению тепловой эффективности стендов, однако его эффект гораздо меньше, чем от применения теплоизолированных крышек. Так для всех исследованных вариантов нагрева подогрев воздуха от  $10$  до  $400^\circ\text{C}$  повышает КПД не более чем на 14 – 15 %, при этом экономия топлива достигает порядка 30 %.

Обогащение дутья кислородом при условии применения водоохлаждаемой горелки, даже в случае подогрева окислителя до температуры  $400^\circ\text{C}$  (нагрев 30)

по энергоэффективности уступает нагреву 10. КПД первого составляет 62,4 %, второго – 65,7 %. Это связано со значительными потерями тепла с водой, которые достигают 15 %. Однако, если применять обогащение дутья кислородом в комплексе с горелками, в которых отсутствуют водоохлаждаемые элементы (нагрев 31), то это обеспечивает существенную экономию топлива. Так при подогреве окислителя до температуры 400 °С при переходе от нагрева 30 к 31 КПД возрастает с 62,4 до 78,2 %, при этом средний расход топлива снижается с 176 до 141 м<sup>3</sup>/ч, т.е. на 25 %.

Оценку экономического эффекта энергосберегающих мероприятий проводили посредством расчета затрат  $Z$ , руб./т стали, на топливо (природный газ), расходуемое на 1 т стали, по выражению:

$$Z = \frac{Q_{\text{ц}}}{(E - M_{\text{ш}})}, \quad (4.60)$$

где  $Q_{\text{ц}} = 5,014 \text{ руб./м}^3$  – текущая цена природного газ.

Для ковшей емкостью 350 т увеличение температуры подогрева воздуха от 10 до 400 °С в комплексе с переходом от использования крышки с зазором 300 мм на конструкцию крышки без зазора приводит к снижению общих расходов топлива с 6024 м<sup>3</sup> до 3912 м<sup>3</sup> т.е. в 1,5 раза, а удельных затрат на тонну транспортируемой стали 89 до 58 руб./т, т.е. на 31 руб./т, что в масштабах предприятия дает ощутимый годовой эффект.

Анализ результатов многовариантных расчетов, проведенных с применением математической модели, показывает, что для стандов разогрева ковшей различной емкости, оборудованных теплоизолированной крышкой, с системой рекуперации тепла и без нее удельный расход условного топлива колеблется в интервале 38,9 до 16,5 кг у.т./т транспортируемой стали. Теоретически необходимый (без различных потерь) для разогрева ковша параметр  $B_{\text{уд}}$  составляет примерно 5 кг у.т./т. Разделим полученный интервал на три условных области 1 – 5 – 20 кг у.т./т (область стандов, характеризующихся высокой тепловой эффективностью), 2 – 20 ÷ 35 кг у.т./т (область стандов, характеризующихся средней тепло-

вой эффективностью) и 3 – более 35 кг у.т./т (область стандов, характеризующихся низкой тепловой эффективностью). На рис. 4.14 представлены полученные области условной классификации стандов по тепловой эффективности.

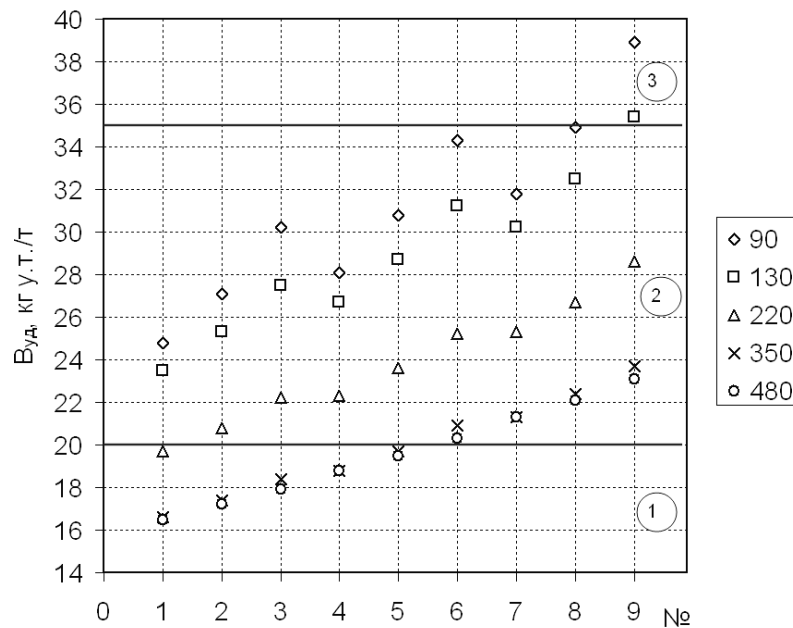


Рисунок 4.14 – Удельные расходы условного топлива для стандов разогрева ковшей различной емкости и различной конструкции

Из рисунка 4.14 видно, что разогрев ковшей большей емкости характеризуется более высокой тепловой эффективностью стандов.

#### Выводы по главе 4

1. Разработана усовершенствованная, многофакторная детерминированная математическая модель тепловой работы газового станда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой, в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение, и тепло-массообменных процессов, протекающих при высокотемпературном разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей.

2. На основе проведенных многовариантных расчетов при использовании детерминированной математической модели установлено, что тепловая эффективность и экономичность стандов разогрева зависят прямо пропорционально от емкости сталеразливочных ковшей для всех серий значений температуры подо-

грева воздуха и зазоров между крышкой и ковшом. Меньшие значения удельных расходов топлива характерны для ковшей большей емкости и связаны в первую очередь с меньшей удельной площадью поверхности кожуха.

3. Установлено, что первоочередным и наиболее эффективным мероприятием, обеспечивающим повышение тепловой эффективности работы стандов, является применение теплоизолированной крышки. Во вторую очередь рекомендуется применение подогрева воздуха. Целесообразность обогащения дутья кислородом зависит от экономических факторов, а его эффективность максимальна в случаях применения горелок без водоохлаждаемых элементов.

4. Установлено наличие характерной зависимости станда КПД от скорости разогрева: зависимость имеет экстремальный характер, причем для ковшей различной емкости экстремум имеет различное значение. При увеличении скорости разогрева от 30 до 80 – 150 °С/ч (в зависимости от емкости ковша) наблюдается рост КПД станда, далее, при более высоких скоростях разогрева КПД снижается.

5. Получен новый критерий  $B_{уд}$  тепловой эффективности стандов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Он представляет собой показатель удельного расхода топлива, затрачиваемого на разогрев футеровки ковша на станде на тонну стали, транспортируемой в ковше. Новый критерий универсален и позволяет оценивать тепловую эффективность работы стандов для разогрева сталеразливочных ковшей разной емкости, с футеровкой различной конструкции и применяемых для ее выполнения огнеупоров и теплоизолирующих материалов, отапливаемых газом различной калорийности. Для его определения не требуется расчет статей теплового баланса. Он может быть определен по фактическому расходу топлива на разогрев футеровки ковша. По значению нового критерия тепловой эффективности конструкции стандов условно классифицированы на три уровня: с высокой тепловой эффективностью  $B_{уд} = 5 - 20$  кг у.т./т, средней  $B_{уд} = 20 - 35$  кг у.т./т и низкой  $B_{уд}$  более 35 кг у.т./т.

## **5 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ СТОЙКОСТИ АЛЮМОПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ ФУТЕРОВОК 350-Т СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ И КАЧЕСТВА СТАЛИ В УСЛОВИЯХ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА № 2 АО «ЕВРАЗ ОБЪЕДИНЕННЫЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»**

В главе представлены результаты разработки мероприятий, направленных на ресурсосбережение, повышение стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т сталеразливочных ковшей в условиях кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Мероприятия включают разработку и применение малообезуглероживающих температурных режимов разогрева футеровок на стендах, обеспечивающих экономию природного газа, снижение глубины обезуглероженного слоя в огнеупорах рабочего слоя, как следствие загрязнения расплава стали экзогенными неметаллическими включениями футеровочного происхождения, а также рекомендации по повышению уровня организации и ритмичности производства [117, 129].

### **5.1 Анализ влияния показателей ритмичности производства на стойкость алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т сталеразливочных ковшей**

Проведен анализ стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т сталеразливочных ковшей кислородноконвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Рассматриваемые огнеупоры различных поставщиков (Duferco S.A., ООО «ВПО сталь», Dalmond, ООО «Группа «Магнезит», ООО «ТД БКО») характеризуются различными показателями стойкости (рис. 5.1). Всего был обработан массив из 50 кампаний различных ковшей, при этом выбирали ковши, промежуточные ремонты («холодные» простои) которых продолжались одинаковое время. В результате статистической обработки данных установлено, что при средней стойкости футеровки на уровне 89 плавов средняя продолжительность кампании ковша составляет 42 сут.

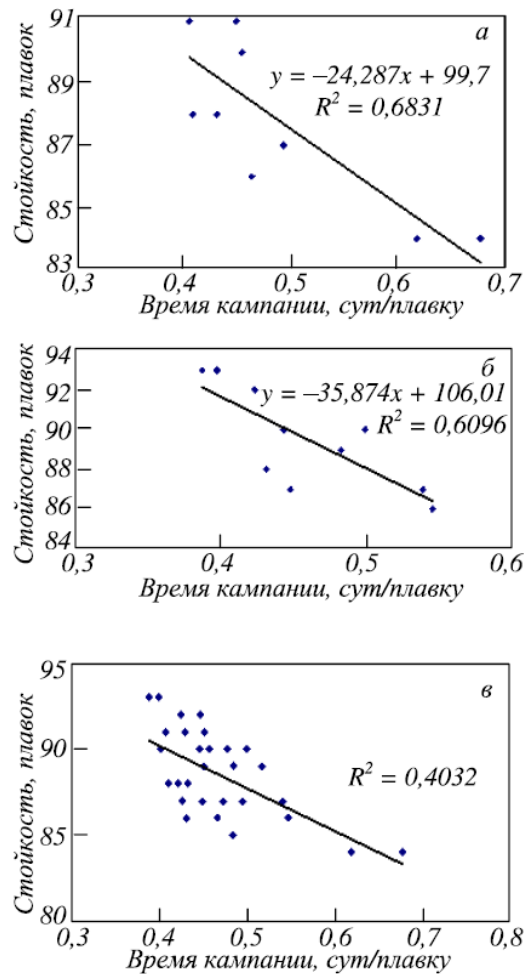


Рисунок 5.1 – Зависимость стойкости футеровки от времени  $\tau$  кампании, приходящееся на одну плавку: *a* и *б* – огнеупоры от поставщиков 1 и 2; *в* – сводные данные по стойкости огнеупоров различных поставщиков

Если оценивать удельную величину время кампании  $\tau$  (сут./плавку), приходящееся на одну плавку (продолжительность одной плавки), определяемую как отношение стойкости футеровки к продолжительности кампании, то наблюдается явная зависимость между этой величиной и стойкостью футеровки (рис. 5.1). По полученным данным сокращение времени кампании, приходящееся на одну плавку, с 0,7 до 0,35 сут./плавку (в два раза) повышает стойкость футеровки примерно с 83 до 91 плавов (в 1,1 раза). Следовательно, сокращение времени «горячего» резервирования ковшей перед приемом расплава, времени разогрева футеровки (в допустимых пределах), простоев (с охлаждением) ковша после разливки является

мощным фактором по повышению стойкости футеровки. Для этого требуется повышение уровня организации и ритмичности производства.

## **5.2 Разработка малообезуглероживающих температурных режимов разогрева футеровок на стендах**

На основании результатов собственных экспериментальных исследований кинетики высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров и опыта [19] разработки малообезуглероживающих температурных режимов разогрева периклазоуглеродистых ковшевых футеровок, для условий 350-т сталеразливочных ковшей кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» проведена серия многовариантных расчетов с применением математической модели.

За базовый вариант приняты температурный режим и технология разогрева в соответствии с ПТИ 899-ККЦ-2-143-2021 «Подготовка и эксплуатация сталеразливочных ковшей и шиберных затворов типа «книжка»». Разогрев реализуется на стенде высокотемпературного нагрева сталеразливочных ковшей № 1, 1а ККЦ-2. Стенды оборудованы водоохлаждаемой горелкой Pyretron. В конструкции горелки предусмотрен принцип двухстадийного сжигания природного газа. Время первой стадии сгорания кислород вводится в струю природного газа. В результате возникшей реакции пиролиза создается яркое ядро пламени, сформированное продуктами неполного сгорания природного газа, содержащими микрочастицы сажистого углерода. На второй стадии сгорания осуществляется введение воздушных струй (воздух обогащен кислородом), которые активно смешиваются, окисляя микрочастицы и остаточные радикалы углеводородов, окиси углерода и водорода. Таким образом, обеспечивается более полное горение природного газа снижение вредных выбросов монооксида углерода и оксидов азота.

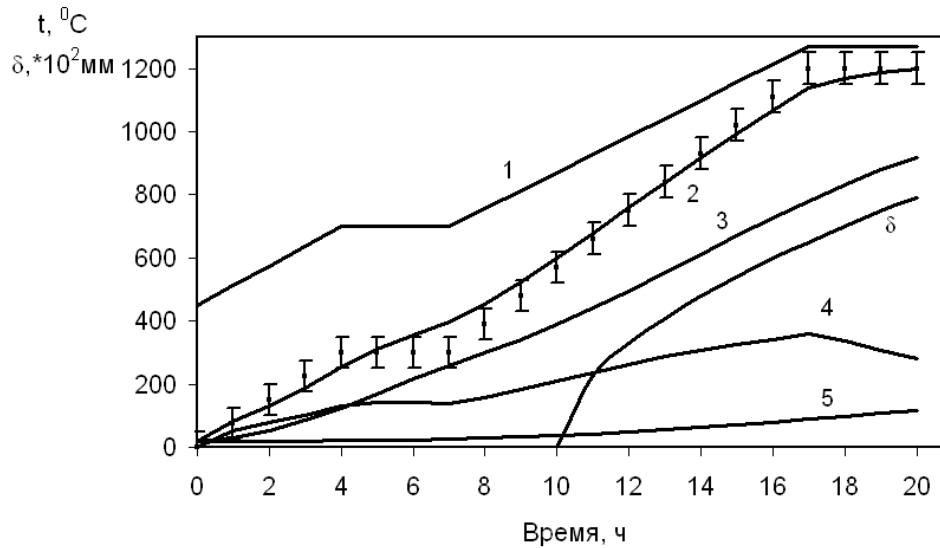
В соответствии с режимной картой работы стендов максимальный расход  $B_{\text{макс}}$  природного газа на стенд составляет  $460 \text{ м}^3/\text{ч}$ , номинальный  $B_{\text{ном}} = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ , минимальный  $B_{\text{мин}} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ , соотношение газ : кислород : воздух  $1 : 1 : 10$ , коэффициент избытка воздуха 1,1. Конструкция футеровки представлена в разделе 4.5.



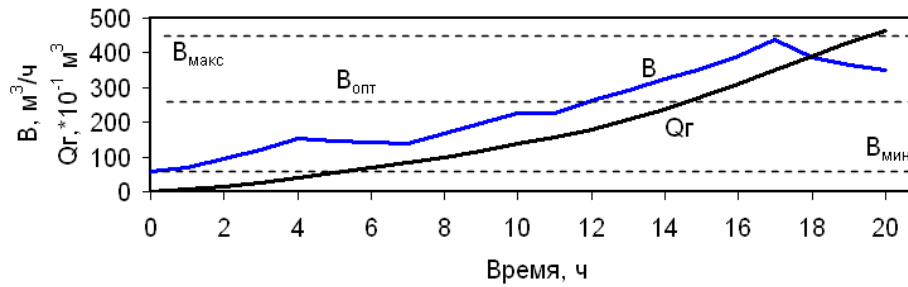
Рабочий слой стен выполнен из алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки АМС 78-8/7НГ.

На рис. 5.2 представлен существующий температурный режим сушки и разогрева футеровки 350-т сталеразливочных ковшей в ККЦ-2, расход топлива на стенд и температурные поля по толщине футеровки в различные периоды времени. Анализ графиков, представленных на рис. 5.2 показывает, что температурный режим содержит четыре стадии. Стадия 1 и 2 относятся к периоду сушки футеровки после капитального ремонта и предназначены для предварительного нагрева и выдержки футеровки при 300 °С с целью удаления влаги, содержащейся в основном в арматурном слое. На стадии 3 происходит разогрев футеровки со скоростью порядка 80 °С/ч. Стадия 4 представляет собой высокотемпературную выдержку при температуре поверхности футеровки близкой к 1200 °С, предназначенную для прогрева футеровки по толщине. Продолжительность анализируемого режима составляет 20 ч. В конце разогрева футеровка имеет температуру поверхности 1299 °С, температуру на стыке рабочего и арматурного слоев 918 °С, температуру кожуха 118 °С, максимальный перепад по толщине рабочего слоя достигает своего максимума 360 °С после 17 ч разогрева. Общий объем  $Q_r$  природного газа на разогрев составляет 4619 м<sup>3</sup>. Расход газа  $B$  на реализацию температурного режима соответствует возможностям горелочного устройства.

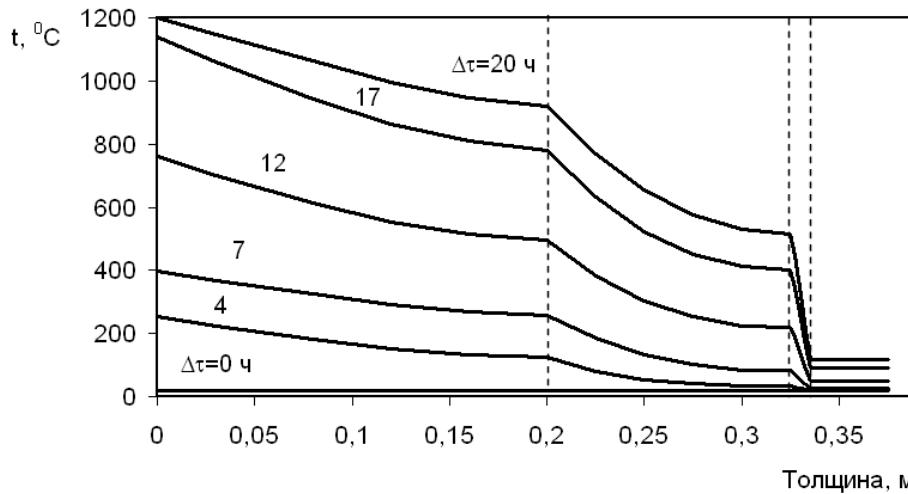
Как видно из рис. 5.2 обезуглероживание рабочего слоя огнеупоров начинается после 10 ч разогрева. В конце разогрева глубина обезуглероженного слоя достигает 7,9 мм. При текущей стойкости футеровки ковшей 89 плавов допустимый износ составляет 100 мм, соответственно износ за одну плавку в среднем достигает  $100/89 = 1,12$  мм. Таким образом, обезуглероживание огнеупора на 7,9 мм может привести к снижению стойкости футеровки почти на семь плавов.



а



б



в

1 – температура греющей среды, 2 – температура поверхности футеровки (точками показаны рекомендованный на предприятии график изменения температуры футеровки), 3 – температура на стыке рабочего и арматурного слоев, 4 – перепад температур по толщине рабочего слоя, 5 – температура кожуха

Рисунок 5.2 – Температурный режим разогрева (а), расходы и объемы природного газа (б), распределение температур по толщине футеровки (в) при существующей на предприятии теплотехнологии

В целях снижения глубины обезуглероженного слоя предлагается малообезуглероживающий ресурсосберегающий режим разогрева (показан красной штриховой линией), принципиальная схема которого представлена на рис. 5.3.

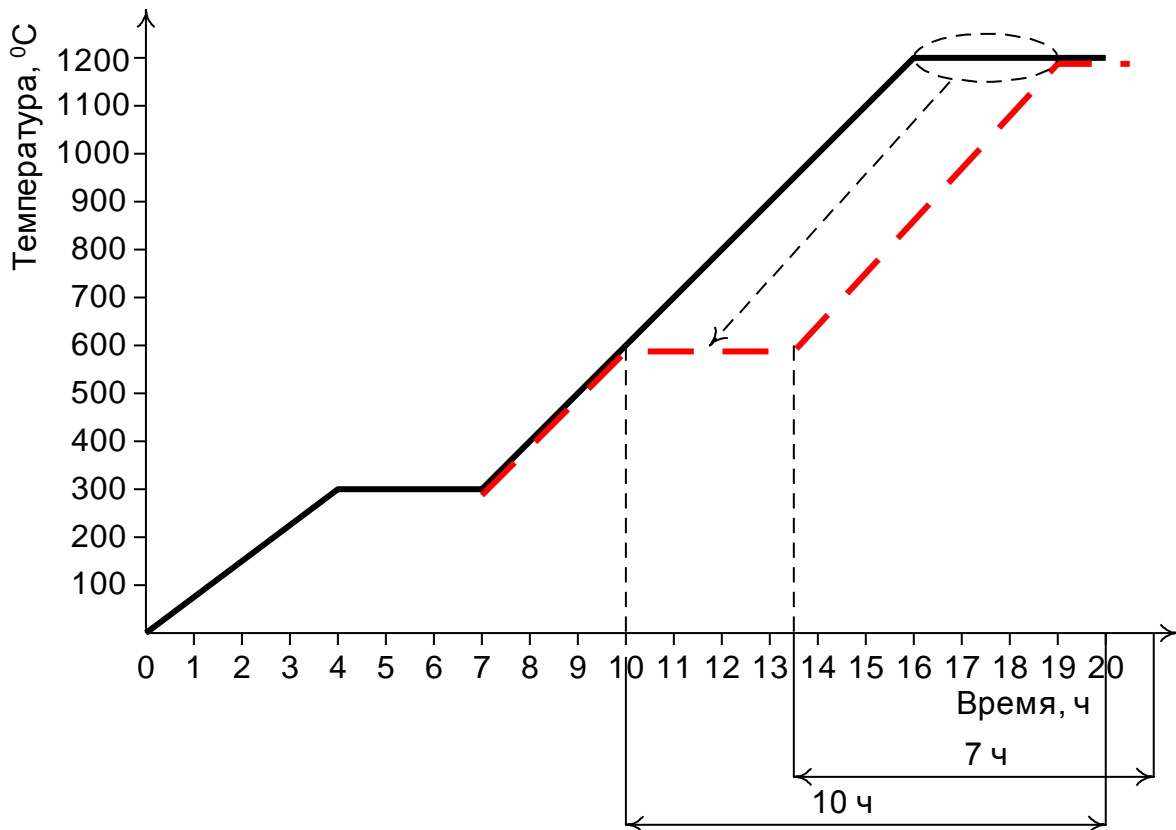


Рисунок 5.3 – Принцип реализации малообезуглероживающего ресурсосберегающего режима разогрева футеровки

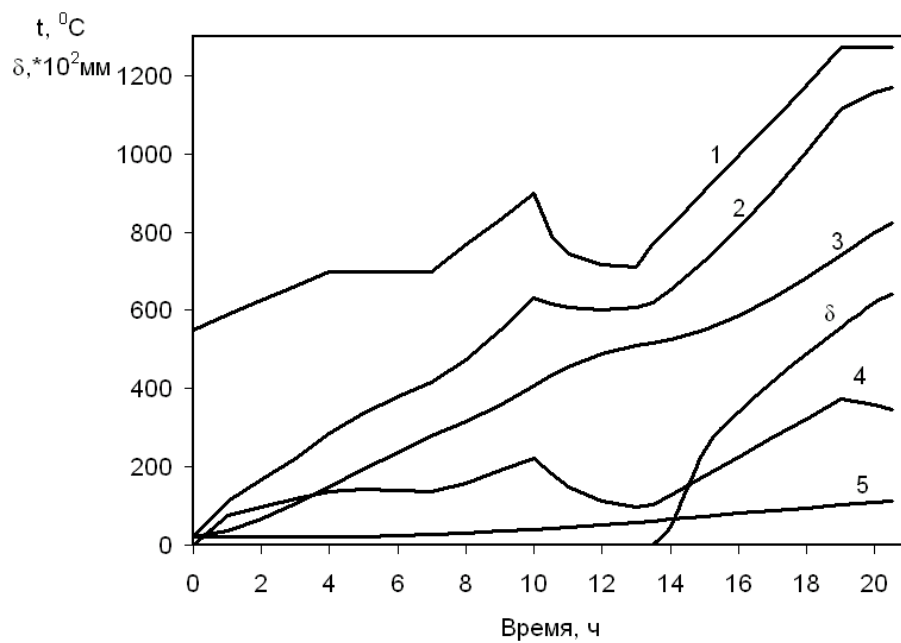
Отличительной особенностью данного режима является частичный или полный перенос (на рис. 5.3 показан штриховой стрелкой) высокотемпературной выдержки с целью прогрева футеровки в среднетемпературную область (менее 650 °C), в которой процессы обезуглероживания протекают с низкой скоростью. Таким образом за стадией сушки следует стадия разогрева футеровки до 600 – 650 °C и выдержка при этих температурах. Далее происходит разогрев до конечных температур. Высокотемпературная выдержка при этом может быть сокращена или ликвидирована в зависимости от достижения параметров качества нагрева и прогрева футеровки. Продолжительность разогрева в таких условиях может оставаться прежней или несколько увеличенной, в зависимости от имеющихся резервов по

производительности отделения разогрева ковшей. Эффект предлагаемого режима основан на том, что при существующем режиме продолжительность интенсивного обезуглероживания огнеупоров рабочего слоя составляет 10 ч, а в малообезуглероживающем – 7 ч (т.е. на 3 ч меньше).

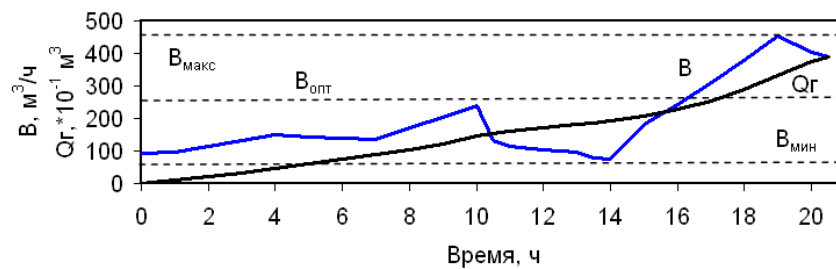
На основе математической модели проведены многовариантные расчеты для практической разработки принципа, представленного на рис. 5.3. Результаты расчетов представлены на рис. 5.4.

Малообезуглероживающий, ресурсосберегающий режим разогрева со среднетемпературной промежуточной выдержкой в течение 3,5 ч при температуре поверхности футеровки менее 650 °С и высокотемпературной выдержкой в течение 1,5 ч при температуре греющей среды 1275 °С обеспечивает разогрев футеровки до температуры поверхности 1183 °С, температуры на стыке рабочего и арматурного слоев 823 °С, кожуха 114 °С. Продолжительность нового режима составляет 20,5 ч (при допустимой, по условиям производительности отделения разогрева сталеразливочных ковшей, продолжительности 21 ч). Максимальный перепад по толщине рабочего слоя достигает своего максимума 374 °С после 19 ч разогрева. Общий объем  $Q_{\Gamma}$  природного газа на разогрев составляет 3903 м<sup>3</sup>, что на 15,5 % меньше при действующем режиме. Расход газа  $B$  на реализацию температурного режима соответствует возможностям горелочного устройства. Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров при реализации малообезуглероживающего режима составляет 6,36 мм, т.е. на 1,54 мм (20 %) меньше чем при существующем режиме, что способствует повышению качества стали по неметаллическим включениям. При износе футеровки 1,12 мм за плавку такое снижение глубины обезуглероженного слоя обеспечивает повышение стойкости футеровки на 1 плавку, т.е. до уровня 90 плавков.

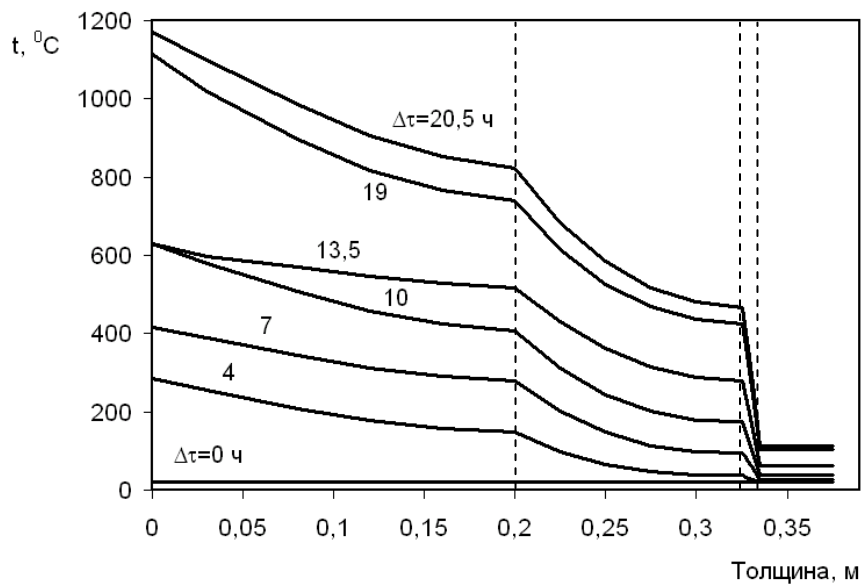
В табл. 5.1 представлены сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева. Малообезуглероживающий режим обеспечивает более экономичную тепловую работу стенда. При его реализации удельный расход условного топлива снижается с 19,0 до 16,0 кг у.т./ т стали.



а



б



в

Рисунок 5.4 – Предлагаемый малообезуглероживающий ресурсосберегающий температурный режим разогрева (а), расходы и объемы природного газа (б), распределение температур по толщине футеровки (в) (обозначения те же, что и на рис. 5.2)

Таблица 5.1 – Сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева

Параметр	Режимы		Разность (С – М)
	существующий (С)	малообезуглероживающий (М)	
Продолжительность, ч	20	20,5	+0,5 ↑
Температура:			
- поверхности футеровки	1199	1183	– 16 ↓
- на стыке рабочего и арматурного слоев	918	823	– 95 ↓
- кожуха	118	114	– 4 ↓
- максимальная греющей среды	1270	1275	+ 5 ↑
Общий объем $Q_{\text{г}}$ природного газа, м <sup>3</sup>	4619	3903	– 716 ↓
Общий объем кислорода, м <sup>3</sup>	4619	3903	– 716 ↓
Глубина обезуглероженного слоя $\delta$ , мм	7,90	6,36	– 1,54 ↓
Стойкость ковша, плавов (наливов)	89	90	+ 1 ↑
Параметры теплового баланса, %:			
- химическое тепло топлива $Q_{\text{т}}^{\text{x}}$	96,9	97,0	+ 0,1
- физическое тепло окислителя $Q_{\text{ок}}$	0,7	0,7	0
- химическое тепло обезуглероживания огнеупора $Q_{\text{об}}^{\text{x}}$	2,4	2,3	– 0,1
- потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду $Q_{\text{теп}}$	3,0	3,8	+ 0,8 ↑
- потери тепла с уходящим дымом $Q_{\text{д}}$	43,6	39,3	– 4,3 ↓
- тепло, аккумулируемое футеровкой $Q_{\text{ак.ф}}$	40,5	44,1	+ 3,6 ↑
- потери тепла излучением $Q_{\text{из}}$	5,0	4,1	– 0,9 ↓
- потери тепла с охлаждающей водой $Q_{\text{вод}}$	1,9	2,3	+ 0,4 ↑
- неучтенные потери $Q_{\text{н.п}}$	6,0	6,4	+ 0,4 ↑
Расход топлива $B$ , м <sup>3</sup> /ч:			
- максимальный	437	453	+ 16 ↑
- минимальный	59	57	– 2 ↓
- средний за период разогрева	234	191	– 43 ↓
Удельный расход условного топлива $B_{\text{уд}}$ , кг у.т./ т стали	19,0	16,0	– 3 ↓
Затраты топлива и кислорода на реализацию режима, руб.	38218	32293	– 5925 ↓

Примечание: зеленый цвет стрелки улучшение параметра, красный ухудшение с точки зрения качества нагрева или тепловой эффективности

Для малообезуглероживающего режима характерны меньшие объемы природного газа и кислорода, затрачиваемые на разогрев, это приводит к снижению затрат на один разогрев на 5925 руб. (при текущей стоимости природного газа 5,014 руб./м<sup>3</sup> и кислорода 3,26 руб./м<sup>3</sup>).

Расчетный прогнозный экономический эффект от увеличения стойкости футеровки ковшей на одну плавку в ценах на огнеупоры в 2022 г. составляет 12 млн. руб.

### 5.3 Применение защитных покрытий для предотвращения обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров

Как было отмечено в разделе 1.1 одним из эффективных способов снижения обезуглероживания углеродсодержащих огнеупоров является применение защитных покрытий. В работах [19, 43, 44] представлен опыт разработки и применения покрытий для 130-т сталеразливочных ковшей электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», футеровка рабочего слоя которых выполнена из периклазоуглеродистых огнеупоров. Для оценки эффективности применения защитных покрытий для алюмопериклазоуглеродистых футеровок 350-т ковшей ККЦ-2 проведена серия промышленных экспериментов. Для исследований использован состав покрытия, разработанный авторами работ [19, 43, 44]. Основа покрытия – молотое силикатное стекло, фракции менее 1 мм, связующее жидкое стекло, которое добавляли в основу до пастообразной консистенции смеси. Покрытие наносили шпателем на половину поверхности полнопрофильного кирпича. Кирпич с помощью стального подвеса крепили на внутренней поверхности футеровки на расстоянии 1 – 1,5 м от верхнего края ковша. Далее ковш разогревали на стенде в соответствии с действующим температурным режимом. После разогрева подвес с кирпичом извлекали, разогретый ковш направлялся для приема расплава, а кирпич охлаждался. На рис. 5.5 представлен внешний вид кирпича после охлаждения.

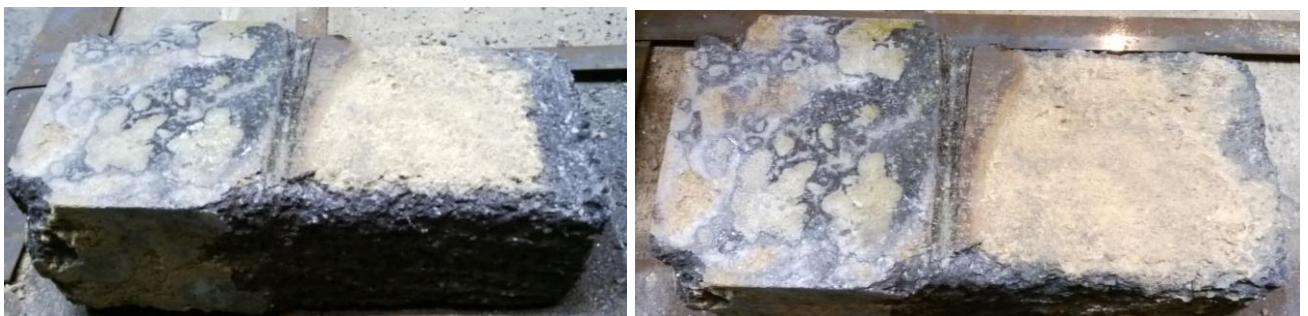


Рисунок 5.5 – Характерный внешний вид алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров после разогрева по действующим режимам (левая половина защищена покрытием)

Левая половина огнеупора, защищенная покрытием, имеет характерный черный цвет, однако присутствуют локальные участки светло коричневого цвета, свидетельствующие о локальном обезуглероживании. Глубина обезуглероженного слоя в области таких участков составляет 1,0 – 1,5 мм. Правая половина огнеупора не защищенная покрытием имеет по всей поверхности характерный светло коричневый цвет, это свидетельствует об обезуглероживании огнеупора по всей не защищенной поверхности. Глубина обезуглероженного слоя в правой половине огнеупора достигает 6 – 8 мм.

Сравнительный анализ левой и правой половин огнеупора показывает, что углы левой половины острые, после тепловой обработки они имеют плотную макроструктуру, достаточно высокую прочность, не скалываются и не осыпаются при механическом воздействии.

Для правой половины огнеупора характерны «заоваленные» углы. После тепловой обработки обезуглероженный огнеупор в углах имеет рыхлую макроструктуру, крошится и осыпается при легком механическом воздействии. Данная особенность отрицательно сказывается на сопротивлении швов кладки проникновению расплава шлака, стали и является причиной дополнительного снижения стойкости футеровки.

Проведенные эксперименты подтверждают перспективность применения покрытий на основе силикатного стекла и жидкого стекла для защиты алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров от обезуглероживания при первом разогреве.

Справки о внедрении результатов исследований в производство на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» представлены в приложениях А и Б.

### **Выводы по главе 5**

1. Сокращение времени «горячего» резервирования ковшей перед приемом расплава и продолжительности разогрева футеровки, простое (с охлаждением) ковша после разливки способствует повышению стойкости футеровки. Сокращение времени кампании, приходящееся на одну плавку, с 0,7 до 0,35 сут/плавку (в



два раза) повышает стойкость футеровки примерно с 83 до 91 плавов (в 1,1 раза). В связи с этим при разработке ресурсосберегающих мероприятий необходимо особое внимание уделять соблюдению ритмичности производства и сокращению времени «горячих» простоев ковша.

2. Для условий ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработан малообезуглероживающий температурный режим разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Малообезуглероживающий, ресурсосберегающий режим разогрева включает разогрев футеровки до 300 °С в течение 4 ч, выдержку продолжительностью 3 ч при этой температуре, разогрев до 600 – 650 °С в течении 3 ч, выдержку продолжительностью 3,5 ч, нагрев до 1100 °С в течение 5,5 ч и нагрев до 1190 – 1200 °С за 1,5 ч. Эффект предлагаемого режима основан на том, что при существующем режиме продолжительность интенсивного обезуглероживания огнеупоров рабочего слоя составляет 10 ч, а в малообезуглероживающем – 7 ч (т.е. на 3 ч меньше). Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров при реализации малообезуглероживающего режима составляет 6,36 мм, т.е. на 1,54 мм (20 %) меньше чем при существующем режиме. При износе футеровки 1,12 мм за плавку такое снижение глубины обезуглероженного слоя обеспечивает повышение стойкости футеровки на одну плавку, т.е. до уровня 90 плавов. Малообезуглероживающий режим обеспечивает более экономичную тепловую работу станда. При его реализации удельный расход условного топлива снижается с 19,0 до 16,0 кг у.т./ т стали. Для малообезуглероживающего режима характерны меньшие объемы природного газа и кислорода, затрачиваемые на разогрев, это приводит к снижению затрат на один разогрев на 5925 руб. (при текущей стоимости природного газа 5,014 руб./м<sup>3</sup> и кислорода 3,26 руб./м<sup>3</sup>). Расчетный прогнозный экономический эффект от увеличения стойкости футеровки ковшей на одну плавку в ценах на огнеупоры в 2022 г. составляет 12 млн руб.

3. Подтверждена эффективность применения покрытий на основе силикатного стекла и жидкого стекла для защиты алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров от обезуглероживания при первом разогреве.

### **Заключение и основные выводы по диссертации**

1. Получены новые количественные данные и эмпирические зависимости по кинетике выгорания углерода, влиянию температурно-временного фактора и состава атмосферы на процессы обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки DALMOND APC-75H1.

2. Установлено, что алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры марки АМС 78-8/7HG, применяемые для футеровки стен сталеразливочных ковшей, содержащие 9,7 % С, по сравнению с периклазоуглеродистыми огнеупорами марок RI-MC175LC и MayCarb 284-AX, применяемыми для футеровки шлакового пояса и содержащими 15,0 и 15,5 % С, характеризуются более высокой стойкостью к обезуглероживанию при нагреве до температур 1100 °С. Окисление углерода, содержащегося в огнеупорах начинается при температуре 450 – 500 °С, заканчивается при 980 – 1000 °С для марки АМС 78-8/7HG и при 960 – 980 °С для марок RI-MC175LC и MayCarb 284-AX. Максимальная скорость окисления углерода (обезуглероживания огнеупора) во всех случаях достигается при температуре 700 – 750 °С. Соответственно в целях реализации малообезуглероживающего первого разогрева ковшей после ремонта для исследуемых марок огнеупоров рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 500 – 600 °С) выдержки футеровки.

3. Исследован фазовый и минералогический состав ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров после тепловой обработки. Установлено, что для обезуглероженных слоев огнеупора свойственна высокая пористость. Характерной особенностью исследуемых огнеупоров является выраженный переход необезуглероженных слоев в обезуглероженные. Граница перехода фиксируется по резкому снижению содержания углерода от исходного состояния до следов.

4. Разработана многофакторная детерминированная математическая модель тепловой работы газового стенда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой, в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение, и тепло-массообменных процессов, протекающих при высокотемпературном разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей.

5. На основе проведенных многовариантных расчетов с использованием детерминированной математической модели установлено, что тепловая эффективность и

экономичность стенов разогрева зависят прямо пропорционально от емкости сталеразливочных ковшей. Меньшие значения удельных расходов топлива характерны для ковшей большей емкости и связаны в первую очередь с меньшей удельной площадью поверхности кожуха. Целесообразность обогащения дутья кислородом зависит от экономических факторов, а его эффективность максимальна в случаях применения горелок без водоохлаждаемых элементов.

6. Получен новый критерий  $B_{уд}$  тепловой эффективности стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Он представляет собой показатель удельного расхода топлива, затрачиваемого на разогрев футеровки ковша на стенде, на тонну стали, транспортируемой в ковше. Новый критерий универсален и позволяет оценивать тепловую эффективность работы стенов для разогрева сталеразливочных ковшей разной емкости с футеровкой различной конструкции и применяемых для ее выполнения огнеупоров и теплоизолирующих материалов, отапливаемых газом различной калорийности. По значению нового критерия тепловой эффективности конструкции стенов условно классифицированы на три уровня: с высокой тепловой эффективностью ( $B_{уд} = 5 - 20$  кг у.т./т), средней ( $B_{уд} = 20 - 35$  кг у.т./т) и низкой ( $B_{уд}$  более 35 кг у.т./т).

7. Установлено, что для условий ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» сокращение времени «горячего» резервирования ковшей перед приемом расплава и продолжительности разогрева футеровки и простоев (с охлаждением) ковша после разливки способствует повышению стойкости футеровки. Сокращение времени кампании, приходящееся на одну плавку, с 0,7 до 0,35 сут./плавку (в два раза) повышает стойкость футеровки примерно с 83 до 91 плавков (в 1,1 раза). В связи с этим при разработке ресурсосберегающих мероприятий необходимо особое внимание уделять соблюдению ритмичности производства и сокращению времени «горячих» простоев ковша.

8. Для условий ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработан малообезуглероживающий температурный режим разогрева футеровок 350-т сталеразливочных ковшей, который включает нагрев до 300 °С в течение 4 ч, выдержку продолжительностью 3 ч при этой температуре, разогрев до 600 – 650 °С в течении 3 ч, выдержку продолжительностью 3,5 ч, нагрев до 1100 °С в течение 5,5 ч и нагрев до 1190 – 1200 °С за 1,5 ч. Эффект предлагаемого режима основан на сокращении продолжительности периода интенсивного обезуглероживания огнеупоров рабочего слоя (при температурах более

650 °С) с 10 ч до 7 ч. Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров при реализации малообезуглероживающего режима снижается с 7,90 до 6,36 мм, т.е. на 1,54 мм (20 %) меньше чем при существующем режиме, что способствует повышению качества стали по неметаллическим включениям и повышению стойкости футеровки на одну плавку. Расчетный прогнозный экономический эффект от увеличения стойкости футеровки ковшей на одну плавку в ценах на огнеупоры в 2022 г. составляет 12 млн руб. Малообезуглероживающий режим обеспечивает более экономичную тепловую работу стенда. При его реализации удельный расход условного топлива снижается с 19,0 до 16,0 кг у.т./ т стали. Для малообезуглероживающего режима характерны меньшие объемы природного газа и кислорода, затрачиваемые на разогрев, это приводит к снижению затрат на один разогрев на 5925 руб.

9. Подтверждена эффективность применения покрытий на основе силикатного и жидкого стекла для защиты алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров от обезуглероживания при первом разогреве.

10. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в производство на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюдкин, Д. А. Современная технология производства стали / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. – М.: Теплотехник, 2007. – 528 с.
2. Дюдкин, Д. А. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
3. Вихлевщук, В. А. Ковшевая доводка стали / В. А. Вихлевщук, В. С. Харахулах, С. С. Бродский. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
4. Стариков, В. С. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии / В. С. Стариков, М. В. Темлянцев, В. В. Стариков. – М.: МИСиС, 2003. – 327 с.
5. Алленштейн, Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник. Пер. с нем. / Й. Алленштейн [и др.]; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 392 с.
6. Кашеев, И. Д. Химическая технология огнеупоров / И. Д. Кашеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
7. Кашеев, И. Д. Оксидноуглеродистые огнеупоры / И. Д. Кашеев. – М.: Интермет инжиниринг, 2000. – 265 с.
8. Аксельрод, Л. М. Оксидноуглеродистые огнеупоры производства ООО «Группа «Магнезит» в футеровке сталеразливочных ковшей / Л. М. Аксельрод, А. П. Лаптев // Новые огнеупоры. – 2010. – № 11. – С. 15 – 19.
9. Левада, А. Г. Пути повышения стойкости сталеразливочных ковшей / А. Г. Левада, Ю. Л. Денисов, Р. Р. Гареев [и др.] // Сталь. – 2010. – № 11. – С. 25, 26.
10. Вислогузова, Э. А. Повышение стойкости футеровок металлургических агрегатов за счет использования новых огнеупоров и схем футеровок / Э. А. Вислогузова, А. В. Шкляев // Бюл. НТИ: Черная металлургия. – 2011. – № 3. – С. 72 – 76.
11. Вислогузова, Э. А. Повышение стойкости футеровок металлургических агрегатов – существенный вклад в стабильную и эффективную работу конвертер-

ного цеха / Э. А. Вислогузова, О. В. Долматов, В. М. Кулик, М. С. Фомичев, Д. В. Корюков // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 45 – 48.

**12.** Мальков, М. А. Прогнозирование эксплуатационных характеристик периклазоуглеродистых огнеупоров / М. А. Мальков // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – № 3. – С. 32 – 35.

**13.** Метелкин, А. А. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали / А. А. Метелкин, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, О. И. Шевченко. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. – 144 с.

**14.** Тассо, П. Новые концепции футеровок сталеразливочных ковшей / П. Тассо, Ф. Этьенн, Дж. Ванг, П. Эткинсон // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 3. – С. 32 – 37.

**15.** Съемщиков, Н. С. Разработка футеровки сталеразливочных ковшей (обзор опыта работ) / Н. С. Съемщиков, А. А. Кондрукевич, К. Н. Бельмаз, Я. А. Минаев // Новые огнеупоры. – 2013. – № 7. – С. 3 – 8.

**16.** Можжерин, А. В. Эволюция дизайна и стойкости футеровки 150-т сталеразливочных ковшей / А. В. Можжерин, В. А. Мусевич, А. П. Дука [и др.] // Новые огнеупоры. – 2009. – № 1. – С. 5 – 14.

**17.** Бондаренко, И. А. Рециклинг периклазоуглеродистых изделий в сталеразливочных ковшах / И. А. Бондаренко, А. Л. Артамошин, Д. Н. Хвесеня, А. Н. Воробьев // Сталь. – 2020. – № 7. – С. 19, 20.

**18.** Окке, С. Характеристика окислительных процессов в углеродсодержащих огнеупорных материалах для металлургии / С. Окке, С. Андре, Ж.-П. Эраув [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 1. – С. 55 – 60.

**19.** Матвеев, М. В. Повышение стойкости периклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей на основе применения ресурсосберегающих технологий разогрева / М. В. Матвеев: дис. канд. техн. наук – 05.16.02 Металлургия черных, цветных и редких металлов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – 152 с.

**20.** Темлянцев, М. В. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев // *Металлург.* – 2010. – № 8. – С. 60 – 62.

**21.** Темлянцев, М. В. Исследование обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей перед приемом расплава / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев // *Изв. вуз. Черная металлургия.* – 2010. – № 10. – С. 38 – 40.

**22.** Темлянцев, М. В. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев, Е. Н. Темлянцева // *Изв. вуз. Черная металлургия.* – 2011. – № 10. – С. 32 – 36.

**23.** Матвеев, М. В. Динамика окисления углерода ПУ огнеупоров, применяемых в сталковшах, и мероприятия по ее снижению / М. В. Матвеев, М. В. Темлянцев, Е. А. Колотов. – В кн.: *Интеллект молодых – производству 2010. Сборник тезисов VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов НКМЗ.* – Краматорск, 2010. – С. 8, 9.

**24.** Серова, Л. В. Исследование окисноуглеродистых огнеупоров – направление выработки требований к поставщикам / Л. В. Серова, Е. В. Чудинова // *Огнеупоры и техническая керамика.* – 2008. – № 6. – С. 27 – 32.

**25.** Шешуков, О. Ю. Оценка износа алюмопериклазоуглеродистых изделий футеровки сталеразливочного ковша / О. Ю. Шешуков, В. В. Левчук, А. А. Метелкин [и др.] // *Сталь.* – 2015. – № 5. – С. 31 – 33.

**26.** Labadie, M. Периклазоалюмоуглеродистые огнеупорные изделия для футеровки сталеразливочных ковшей / M. Labadie, J. Mirabelli, A. Rapetto, etc. // *Огнеупоры и техническая керамика.* – 2013. – № 1-2. – С. 76 – 80.

**27.** Рябый, Д. В. Механизм образования локального (дырочного) износа периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша / Д. В. Рябый, А. А. Кондрукевич, С. В. Семирягин // *Новые огнеупоры.* – 2016. – № 9. – С. 3 – 6.

**28.** Hampel, M. Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstofferzeugnissen: dissertation / M. Hampel. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg, 2010. – 226 p.

**29.** Белоусова, В. Ю. Огнеупоры для рабочей футеровки стен сталеразливочных ковшей: периклазоуглерод или алюмопериклазоуглерод? / В. Ю. Белоусова // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 3. – С. 27 – 30.

**30.** Бухебнер, Г. Термомеханический расчет периклазоуглеродистого кирпича для сталеразливочных ковшей / Г. Бухебнер, Р. Нойбекк, Й. Эдер, Й. Студница // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 9. – С. 43 – 46.

**31.** Рунгос, В. Положительное влияние нанодобавок на термомеханические свойства огнеупоров  $Al_2O_3 - C$  и  $MgO - C$  / В. Рунгос, С.Г. Анезерис, Х. Берек, Э. Скиера, С. Томсер // Новые огнеупоры. – 2013. – № 9. – С. 24 – 36.

**32.** Кащеев, И. Д. Свойства периклазоуглеродистых огнеупоров с добавками металлических порошков / И. Д. Кащеев, В. И. Сизов, О. А. Панин // Огнеупоры. – 1989. – № 8. – С. 7 – 9.

**33.** Очагова, И. Г. Повышение стойкости к окислению высокоуглеродистых бетонов с применением смеси антиоксидантов / И. Г. Очагова // Новости черной металлургии за рубежом. – 2011. – №1. – С. 88 – 91.

**34.** Симонов, К. В. Влияние антиокислительных добавок на свойства периклазоуглеродистых огнеупоров на нетоксичной связке / К. В. Симонов, В. Н. Коптелов, Г. В. Будрина [и др.] // Огнеупоры. – 1989. – № 10. – С. 32 – 34.

**35.** Да Сильвейра, В. Коллоидная обработка антиоксидантов для манипулирования микроструктурой в  $MgO - C$ -кирпиче / В. Да Сильвейра, Г. Фальк, Р. Клазен // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 10. – С. 32 – 41.

**36.** Кочубеев, Ю. Н. Разработка оптимального состава шихты для периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочных ковшей ЭСПЦ / Ю. Н. Кочубеев, Н. А. Босякова, Ю. В. Неклюдова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2007. – № 3. – С. 43 – 45.



**37.** Босякова, Н. А. Алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры производства ООО «Огнеупор» / Н. А. Босякова, С. А. Поморцев, Р. Г. Гизатуллин [и др.] // Новые огнеупоры. 2021. № 7. С. 10 – 13.

**38.** Сиваш, В. Г. Защитные покрытия для графит содержащих изделий / В. Г. Сиваш, А. Д. Хомкитина, Г. Д. Быкова // Огнеупоры. – 1980. – №1. – С. 12 – 15.

**39.** Белоусов, Ю. Л. Глазурь для углеродсодержащих огнеупоров / Ю. Л. Белоусов, В. Г. Сиваш, А. Д. Хомутинина [и др.] // Огнеупоры. – 1980. – №12. – С. 5 – 9.

**40.** Кокушкин, Б. Я. Формирование и окислительные свойства защитных покрытий системы  $\text{CaO-MgO-SiO}_2$  на силицированном графите / Б. Я. Кокушкин, Т. С. Брусенцева, Г. А. Кравецкий, С. П. Артемьева // Огнеупоры. – 1989. – № 9. – С. 26 – 29 .

**41.** Кашеев, И. Д. Основы формирования защитных покрытий на огнеупорах / И. Д. Кашеев // Огнеупоры. – 1991. – №3. – С. 5 – 7.

**42.** Семченко, Г. Д. Синтез  $\beta\text{-SiC}$  в промежуточном слое корундовых покрытий на золь-гель связующем для защиты графитовых изделий от окисления / Г. Д. Семченко, И. Ю. Шутеева, М. И. Рыщенко [и др.] // Новые огнеупоры. – 2010. – № 12. – С. 23 – 27.

**43.** Темлянцев, М. В. О применении покрытий для предотвращения обезуглероживания периклазоуглеродистых огнеупоров при разогреве ковшевых футеровок. / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев, К. Е. Костюченко [и др.] // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение. – 2011. – Вып. 13. – С. 130 – 133.

**44.** Матвеев, М. В. Разработка технологии разогрева сталеразливочных ковшей с защитным покрытием / М. В. Матвеев, Г. В. Булычев, М. В. Темлянцев. – В кн.: Металл 2011. Материалы международной научно-технической конференции молодых работников РУП «БМЗ», 6-8 июля 2011 г. – Жлобин, 2011. – С. 33 – 36.

**45.** Денисов, Д. Ю. Огнеупорное покрытие на основе отходов цветной металлургии / Д. Ю. Денисов, В. З. Абдрахимов // Новые огнеупоры. – 2011. – № 11. – С. 33 – 37.

**46.** Очагова, И. Г. Перспективы разработки самоглазурующихся  $Al_2O_3$ -С-огнеупоров для применения в стопорах-моноблоках / И. Г. Очагова. // ОАО «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. – 2012. – № 1. – С. 93 – 96

**47.** Сенников, С. Г. Влияние технологических режимов эксплуатации на стойкость футеровки фирмы «Mayerton» в 385-т сталеразливочных ковшах / С. Г. Сенников, А. В. Шестаков, Ф. С. Каплан [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 9. – С. 48 – 54.

**48.** Стриченко, С. М. Мероприятия по повышению стойкости огнеупорных изделий сталеразливочного ковша / С. М. Стриченко, В. В. Беляев, В. С. Любименко // Сталь. – 2021. – № 7. – С. 15, 16.

**49.** Бершицкий, И. М. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей / И. М. Бершицкий, А. В. Тарарышкин // Сталь. – 2010. – № 2. – С. 24, 25.

**50.** Бершицкий, И. М. Разработка и внедрение высокоэффективных электрических установок сушки и нагрева футеровок разливочных ковшей для черной и цветной металлургии / И. М. Бершицкий, Б. А. Сивак, Я. Л. Кац // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 14 – 18.

**51.** Краснянский, М. В. Эффективность электронагрева футеровки сталеразливочных ковшей / М. В. Краснянский, Я. Л. Кац, И. М. Бершицкий // Металлург. – 2012. – № 5. – С. 48 – 53.

**52.** Краснянский, М. В. Исследование и совершенствование энергетического режима внепечной обработки стали в ковшах малой вместимости / М. В. Краснянский: дис. канд. техн. наук – 05.16.02 Металлургия черных, цветных и редких металлов. – Москва, 2014. – 130 с.

**53.** Бершицкий, И. М. Разработка и внедрение высокоэффективных электрических установок сушки и нагрева футеровок разливочных ковшей для черной

и цветной металлургии / И. М. Бершицкий, Б. А. Сивак, Я.Л. Кац // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 14 – 18.

**54.** Явойский, В. И. Включения и газы в сталях / В. И. Явойский [и др.]. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.

**55.** Виноград, М. И. Включения в стали и ее свойства / М. И. Виноград. – М.: Металлургиздат, 1963. – 252 с.

**56.** Виноград, М. И. Включения в легированных сталях и сплавах / М. И. Виноград, Г. П. Громова. – М.: Металлургия, 1971. – 216 с.

**57.** Воскобойников, В. Г. Общая металлургия. 4-е изд, перераб. и доп. / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. – М.: Металлургия, 1985. – 480 с.

**58.** Ойкс, Г. Н. Производство стали. Расчеты. / Г. Н. Ойкс, Х. М. Иоффе; под ред Г. Н. Ойкса. – М.: Металлургия, 1975. – 480 с.

**59.** Моисеева, Л. А. Особенности состава и структуры экзогенных включений в стали и причины их образования / Л. А. Моисеева, Б. П. Моисеев // Сталь. – 2007. – № 7. – С. 22 – 28.

**60.** Добужская, А. Б. Исследование состава и источников поступления неметаллических включений, вызывающих образование контактно-усталостных дефектов в рельсах производства нижнетагильского металлургического комбината / А. Б. Добужская, А. А. Дерябин, В. Е. Семенов [и др.] // Бюл. НТЭИ: Черная металлургия. – 2006. – № 10. – С. 33 – 36.

**61.** Зайцев, А. И. Новые типы неблагоприятных неметаллических включений на основе  $MgO - Al_2O_3$  и металлургические факторы, определяющие их содержание в металле / А. И. Зайцев, И. Г. Родинова, Г. В. Семернин [и др.] // Металлург. – 2011. – № 3. – С. 50 – 56.

**62.** Вюнненберг, К. Повышение чистоты стали при непрерывной разливке / К. Вюнненберг, Ю. Капель // Черные металлы. – 2010. – № 6. – С. 42 – 48.

**63.** Шахпазов, Е. Х. К проблеме неметаллических включений в стали / Е. Х. Шахпазов, А. И. Зайцев, С. Д. Зинченко [и др.] // Бюл. НТЭИ: Черная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 43 – 47.

**64.** Ракоски, Ф. Неметаллические включения в стали / Ф. Ракоски // Черные металлы. – 1994. – № 7. – С. 49 – 54.

**65.** Дуб, В. С. Анализ взаимодействия экзогенных и эндогенных включений и условий их укрупнения / Дуб В. С., Сафронов А. А., Ронков Л. В., Мальгинов А. Н., В. А. Новиков // Сталь. – 2020. – № 8. – С. 14 – 20.

**66.** Бигеев, А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали / Бигеев А. М., Бигеев В. А. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.

**67.** Корчагин, К. А. Влияние износа футеровки ковша на образование неметаллических включений в процессе внепечной обработки / К. А. Корчагин // Новости черной металлургии за рубежом. – 2005. – № 3. – С. 31 – 33.

**68.** Лоренц, В. Фирма «Мареко» на мировом рынке оборудования для сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей и желобов доменных печей / В. Лоренц, А. Локтев, В. Гартен, Д. Бехманн // Новые огнеупоры. – 2007. – № 12. – С. 19 – 27.

**69.** Темлянцев, М. В. Анализ особенностей тепловой обработки периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев, К. Е. Костюченко, М. Ю. Лосяцкая // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение: Сборник научных трудов. – 2012. – Вып. 14. – С. 137 – 142.

**70.** Вихлевщук, В. А. Высокотемпературный нагрев футеровки сталеразливочных ковшей / В. А. Вихлевщук, А. С. Стороженко, А. П. Шкирмонтов, Ю. Ф. Вяткин // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 1992. – № 9. – С. 13 – 22.

**71.** Строгонов, К. В. Энергосбережение при сушке и нагреве футеровки сталеразливочных ковшей / К. В. Строгонов, С. К. Попов, Д. А. Абакин // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 7 – 10.

**72.** Запольская, Е. М. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2013. – № 15. – С. 128 – 134.

**73.** Муриков, М. А. Использование теплозащитных крышек для сталеразливочных ковшей на РУП «БМЗ» / М. А. Муриков, А. И. Носовец, В. М. Носовец, А. В. Оленченко, И. И. Шкулькова // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 1 (45). – С. 28 – 30.

**74.** Кононов, В. А. Современная высокотемпературная теплоизоляция сталеразливочных ковшей / В. А. Кононов, И.И. Земсков // *Новые огнеупоры*. – 2012. – № 5. – С. 20 – 25.

**75.** Чайкин, Б. С. Современные установки для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей / Б. С. Чайкин, Г. Е. Марьянчик, Е. М. Панов [и др.] // *Новые огнеупоры*. – 2016. – № 10. – С. 21 – 25.

**76.** Kelly, J. Oxygen-enhanced ladle preheating systems: improved tap-to-tap cycle time and operating cost reductions / J. Kelly, F. Dentella, A. Recanati [et al.] // *Iron & Steel Technology*. – 2011. – № 5. – С. 307 – 311.

**77.** Ревун, М. П. Интенсификация работы нагревательных печей / М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз. – Киев: Техніка, 1987, 1987. – 136 с.

**78.** Лоренц, В. Современные пути решения технологических и технических проблем сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей / В. Лоренц, А. Локтев, В. Гартен, Д. Бехманн // *Сталь*. – 2007. – № 11. – С. 74 – 77.

**79.** Лоренц, В. Фирма «Мареко» на мировом рынке оборудования для сушки, разогрева и термостатирования металлургических ковшей и желобов доменных печей / В. Лоренц, А. Локтев, В. Гартен, Д. Бехманн // *Новые огнеупоры*. – 2007. – № 12. – С. 19 – 27.

**80.** Kelly, J. Oxygen-enhanced ladle preheating systems: improved tap-to-tap cycle time and operating cost reductions / J. Kelly, F. Dentella, A. Recanati [at al.] // *Iron & Steel Technology*. – 2011. – № 5. – С. 307 – 311.

**81.** Темлянцев, М. В. К вопросу об эффективности применения внешней теплоизоляции при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей / М. В. Темлянцев, М. В. Матвеев. – В кн.: *Металлургия: технологии, управление, инновации*,

качество. Труды Всероссийской научно-практической конференции, 6-9 октября 2009 г. – Новокузнецк, 2009. – С. 246 – 248.

**82.** Стерлигов, В. В. Условия стагнации воздушного слоя для теплоизоляции / В. В. Стерлигов, Е. А. Плюснина // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3. – С. 44 – 47.

**83.** Стерлигов, В. В. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности / В. В. Стерлигов, Д. А. Шадринцева // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 2. – С. 30 – 35.

**84.** Винтовкин, А. А. Современные горелочные устройства (конструкция и технические характеристики) / А. А. Винтовкин, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский, А. Б. Усачев. – М.: Машиностроение – 1, 2001. – 496 с.

**85.** Рязанов, В. Т. Новые горелки-теплогенераторы для систем отопления, сушки и высокотемпературного нагрева / В. Т. Рязанов, А. А. Винтовкин, В. В. Деньгуб и др. // Сталь. – 2000. – № 12. – С. 89 – 91.

**86.** Темлянцев, М. В. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства / М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева – М.: Металлургия, 2008. – 183 с.

**87.** Гартен, В. Концепция модернизации участка подготовки сталеразливочных ковшей: внедрение и развитие эксплуатации монолитной футеровки, комплекс технологического оборудования / В. Гартен, А. Хохлов, В. Уссельманн, И. Фомина // Новые огнеупоры. – 2013. – № 4. – С. 34 – 39.

**88.** Арутюнов, В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

**89.** Волкова, О. Моделирование температурных полей в сталеразливочных ковшах с футеровкой из доломитовых кирпичей или высокоглиноземистой массы / О. Волкова, Д. Янке // Черные металлы. – 2003. – Февраль. – С. 26 – 31.

**90.** Rieche, K. Über den Einfluss des Warmezustandes der Pfannenausmauerung und einer warmeisolierenden Abdeckung auf den Temperaturverlust der Schmelze / K. Rieche, W. Kohn, K. Wünnenberg // Stahl und Eisen. – 1985. – No. 19. – P. 41 – 46.

- 91.** Borovikov, R. Final Report BRITE EURAM PROJEKT Nr. 96-3124 / R. Borovikov, O. Volkova, D. Janke. – 2001. Abbildung 12.26.
- 92.** Yilmaz, S. FEM Untersuchungen des thermomechanischen Verhaltens von MgO/C und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Spinell im Verschleifpuffer einer 120-t Pfanne / S. Yilmaz, H. F. Schweiger, S. Ozgen // Stahl und Eisen Special. – 1997. – Sept. – P. 31 – 34.
- 93.** Павлов, Я. В. Моделирование теплофизических процессов в футеровке сталеразливочного ковша / Я. В. Павлов, В. В. Белоусов, В. В. Михеев // Мат. мод. – 2012. – № 2 (27). – С. 19 – 22.
- 94.** Григорьев, А. С. Компьютерное моделирование влияния вспомогательных слоев футеровки сталеразливочного ковша на локализацию направления роста термических трещин / А. С. Григорьев, С. В. Данильченко, А. И. Дмитриев [и др.] // Новые огнеупоры. – 2022. – № 10. – С. 3 – 15.
- 95.** Bannenberg, N. Temperaturüberwachung der Stahlschmelze in einem LD-Stahlwerk / N. Bannenberg // Stahl und Eisen. – 1994. – Vol. 114. – No. 9. – P. 77 – 82.
- 96.** Темлянцева, Е. Н. Исследование тепловой работы футеровок ковшей для разливки алюминия / Е. Н. Темлянцева, В. С. Стариков, М. В. Темлянец // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2002. – № 11. – С. 27 – 30.
- 97.** Сущенко, А. В. Математическое моделирование процессов сушки и разогрева сталеразливочного ковша / А. В. Сущенко, А. И. Травинчев, А. С. Безчерев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 5. – С. 42 – 45.
- 98.** Шкляр, Ф. Р. Режимы отопления сталеразливочного ковша / Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, В. А. Коршунов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 4. – С. 84, 85.
- 99.** Шкляр, Ф. Р. Математическая модель тепловой работы сталеразливочного ковша / Ф. Р. Шкляр, В. М. Малкин, В. А. Коршунов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 91 – 93.
- 100.** Бейцун, С. В. Исследование теплового состояния сталеразливочных ковшей на компьютерной модели / С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. И. Шibaкинский // Черные металлы. – 2014. – Август. – С. 23 – 27.

**101.** Матвеев, М. В. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / М. В. Матвеев, М. В. Темлянцев, Е. М. Запольская, К. Е. Костюченко // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2013. – № 31. – С. 31 – 44.

**102.** Jin, S. Thermo-Mechanical Modelling of Steel Ladle Process Cycles / S. Jin, D. Auer, D. Gruber [et al.] // Interceram Refractories Manual. – 2012. – No. 1. – P. 37 – 41.

**103.** Краснянский, М. В. Совершенствование теплового режима эксплуатации сталеразливочных ковшей / М. В. Краснянский, Я. Л. Кац // Электromеталлургия. – 2016. – № 4. – С. 2 – 10.

**104.** Безчерев, А. С. Разработка и внедрение футерованной крышки для стенов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей и новых режимов их тепловой обработки / А. С. Безчерев, Н. И. Горлач, Ю. Н. Попов [и др.] // Бюл. НТЭИ: Черная металлургия. – 2009. – № 5. – С. 62 – 67.

**105.** Пфайфер, Х. Тепловая модель нагрева сталеразливочных ковшей / Х. Пфайфер, Ф. Фетт, Х. Шеффер [и др.] // Черные металлы. – 1985. – № 14. – С. 3 – 8.

**106.** Стариков, В. С. Моделирование тепловой работы футеровки металлургических ковшей / В. С. Стариков, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 10. – С. 55, 56.

**107.** Заболотский, А. В. Модель разогрева футеровки сталеразливочного ковша / А. В. Заболотский // Новые огнеупоры. – 2010. – № 8. – С. 32 – 34.

**108.** Белоусова, В.Ю. Разработка методики расчета распределения температур в многослойной стенке сталеразливочного ковша. Расчет температуры на кожухе ковша с периклазоуглеродистой рабочей футеровкой и антиоксидантом / В. Ю. Белоусова, Д. А. Пускин, Д. Ю. Зорин // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 4. – С. 28 – 35.

**109.** Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика / В. Штиллер. – М.: Мир, 2000. – 176 с.



**110.** Протопопов, Е. В. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров / Е. В. Протопопов, М. В. Темлянцев, Е. М. Запольская, К. Е. Максакова, В. А. Дегтярь // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. – № 12. – С. 24 – 28.

**111.** Protopopov, E. V. High-temperature decarburization of alumina-periclase-carbon ladle refractories / E. V. Protopopov, M. V. Temlyantsev, E. M. Zapol'skaya, K. E. Maksakova, V. A. Degtyar' // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – No. 12. – P. 879 – 882.

**112.** Якушевич, Н. Ф. Исследование процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров / Н. Ф. Якушевич, Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 8. – С. 555 – 562.

**113.** Темлянцев, М. В. Исследование минералогического и фазового составов обезуглероженных слоев ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров / М. В. Темлянцев, Е. В. Протопопов, Н. И. Кувшинникова, Е. М. Запольская [и др.]. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. – Новокузнецк, 2021. – С. 122–126.

**114.** Кувшинникова, Н. И. Исследование минералогического состава обезуглероженных слоев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров / Н. И. Кувшинникова, Е. М. Запольская. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк, 2021. – С. 396 – 400.

**115.** Протопопов, Е. В. Исследование обезуглероживания углеродсодержащих ковшевых огнеупоров / Е. В. Протопопов, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко, Е. М. Запольская. – В кн.: Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавильщиков и производителей металла. – 2016. – С. 388 – 393.

**116.** Темлянцев, М. В. Обезуглероживание алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров при первом разогреве ковшевых футеровок / М. В. Темлянцев, Е. М. Запольская, К. Е. Костюченко. – В кн.: Творческое наследие В. Е. Грум-

Гржимайло: история, современное состояние, будущее. Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения великого русского ученого-металлурга Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло. 2014. – С. 435 – 440.

**117.** Запольская, Е. М. Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, А. В. Григорьев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2019. – № 2 (28). – С. 7 – 10.

**118.** Запольская, Е. М. Разработка детерминированной математической модели процессов тепломассообмена при разогреве футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, А. В. Феоктистов, М. В. Темлянцев, В. В. Бухмиров, Е. Н. Бушуев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 1. – С. 25 – 33.

**119.** Запольская, Е. М. Оценка тепловой эффективности стенов высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей различной емкости / Е. М. Запольская, А. В. Феоктистов, М. В. Темлянцев. – В кн.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. – 2017. – С. 162 – 165.

**120.** Темлянцев, М. В. Математическое моделирование тепловой работы стенов разогрева футеровок металлургических ковшей / М. В. Темлянцев, Е. М. Запольская, К. Е. Максакова. – В кн.: Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2016. – С. 393 – 405.

**121.** Запольская, Е. М. Оценка влияния емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов разогрева / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко. – В кн.: Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции. – 2013. – С. 18 – 23.

**122.** Запольская, Е. М. Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровки сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко, М. В. Матвеев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2013. – № 6. – С. 3.

**123.** Запольская, Е. М. Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко, М. В. Матвеев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 3 – 7.

**124.** Запольская, Е. М. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, К. Е. Костюченко // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2 (4). – С. 28 – 32.

**125.** Перетятко, В. Н. Нагрев стальных слэбов / В. Н. Перетятко, Н. В. Темлянцев, М. В. Темлянцев, Ю. Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.

**126.** Маковский, В. А. Алгоритмы управления нагревательными печами / В. А. Маковский, И. И. Лаврентик. – М.: Металлургия, 1977. – 183 с.

**127.** Кривандин, В. А. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии / В. А. Кривандин, А. В. Егоров. – М.: Металлургия, 1989. – 462 с.

**128.** Запольская, Е. М. Анализ, выбор и обоснование критериев тепловой эффективности стенов разогрева металлургических ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, А. В. Феоктистов. – В кн.: Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы Инновационного конвента. – Кемерово. – 2017. – С. 371 – 373.

**129.** Запольская, Е. М. Анализ влияния показателей ритмичности производства на стойкость алюмопериклазовых футеровок сталеразливочных ковшей / Е. М. Запольская, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2020. – № 3 (33). – С. 42 – 44.



## СПРАВКА

о промышленном внедрении результатов научно-исследовательской работы

Инициативная научно-исследовательская работа «Разработка малообезуглероживающих температурных режимов разогрева углеродсодержащих футеровок 350-т сталеразливочных ковшей», выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» коллективом ученых кафедры теплоэнергетики и экологии. Научный руководитель д.т.н., профессор М.В. Темлянец, ответственный исполнитель соискатель Е.М. Запольская.

В рамках НИР установлены зависимости и закономерности влияния температурно-временного фактора на обезуглероживание ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров, применяемых на предприятии. Разработан малообезуглероживающий температурный режим разогрева футеровок 350-т сталеразливочных ковшей на стендах № 1, 1а ККЦ-2, который включает разогрев футеровки до 300 °С в течение 4 ч, выдержку продолжительностью 3 ч при этой температуре, разогрев до 600 – 650 °С в течении 3 ч, выдержку продолжительностью 3,5 ч, нагрев до 1100 °С в течение 5,5 ч и нагрев до 1190 – 1200 °С за 1,5 ч. Эффект предлагаемого режима основан на сокращении продолжительности периода интенсивного обезуглероживания огнеупоров рабочего слоя (при температурах более 650 °С) с 10 ч до 7 ч. Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров при реализации малообезуглероживающего режима снижается с 7,90 до 6,36 мм, т.е. на 1,54 мм (20 %) меньше чем при существующем режиме.

Разработанный малообезуглероживающий режим рекомендован к практическому применению. Прогнозируемое увеличение стойкости футеровки – на 1 плавку. Расчетный ожидаемый экономический эффект от увеличения стойкости футеровки 350-т сталеразливочных ковшей на 1 плавку в ценах на огнеупоры 2022 г. составляет 12 млн. руб.

Данный документ подтверждает научную и практическую значимость результатов НИР и не является основанием для финансовых претензий.

Подготовлена

(подпись)

Матвеев М.В.





СИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

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

**Утверждаю**

Проректор по научной и инновацион-  
ной деятельности, д.т.н., профессор

 С.В. Коновалов  
«»  2022 г.

### Справка

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Запольской Екатерины Михайловны «Совершенствование ресурсосберегающих технологий высокотемпературного разогрева и повышение стойкости алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей»:

– малообезуглероживающие ресурсосберегающие температурные режимы высокотемпературного разогрева алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей на газовых стендах;

– новый критерий тепловой эффективности стендов разогрева ковшевых футеровок;

– усовершенствованная многофакторная детерминированная математическая модель тепловой работы газового стенда, оборудованного водоохлаждаемой горелкой, в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение, и тепло-массообменных процессов, протекающих при высокотемпературном разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей

**внедрены** в учебный процесс на кафедре теплоэнергетики и экологии (протокол от 13.12.2022 г. № 5) и используются при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 22.03.02, 22.04.02 «Металлургия», 13.03.01, 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

И.о. зав. кафедрой теплоэнергетики  
и экологии, к.т.н.

 Е.Н. Темлянцева

Начальник учебного отдела



Д.А. Фадеева