



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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: Темлянецв Михаил Викторович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Спирин Николай Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Роговский Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлургические технологии» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Защита состоится «26» ноября 2024 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42.

Факс: (3843) 46-57-92

E-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и на официальном сайте университета www.sibsiu.ru

Автореферат разослан: «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.401.01
д.т.н., доцент



А.А. Уманский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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 футеровки. 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 %, повышению себестоимости производимой стали, увеличивает риск загрязнения расплава стали неметаллическими включениями футеровочного происхождения. 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 эрозийностойких 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. Аристо-

ва, 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 стенок разогрева футеровок сталеразливочных ковшей посвящены труды В.А. Вихлевщук, Ф.Р. Шкляра, К. Рама, М.В. Краснянского и др. В то же время, малоизученной областью являются кинетика высокотемпературного окисления 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 стенок, 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, RI-MC175LC 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. Рентгенофа-

зовый 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; применением 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 конференции 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, 5 статей 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна работы, показана практическая значимость, описана методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации, публикациях и структура диссертации.

В первой главе рассмотрены металлургические аспекты применения углеродсодержащих огнеупоров в футеровках сталеразливочных ковшей, влияние алюмопериклазоуглеродистых и периклазоуглеродистых огнеупоров на загрязненность стали неметаллическими включениями, проведен критический анализ теплотехнологий и конструкций стендов для высокотемпературного разогрева углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей, представлен обзор математических моделей тепловой работы стендов разогрева ковшевых футеровок.

Вторая глава посвящена описанию методик экспериментальных исследований и применяемого оборудования. 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 таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых ковшевых огнеупоров

Химический элемент	Содержание, % (по массе), химического элемента в огнеупоре марки (место применения в футеровке ковша)			
	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 ₂	–	5,0	2,0	3,1
CaO	–	0,6	1,7	1,0
Fe ₂ O ₃	–	2,2	1,5	0,7
C _{общ}	7,0	9,7	15,0	15,5
Al ₂ O ₃	75,0	72,1	4,0	2,6

Кинетику обезуглероживания углеродсодержащих огнеупоров исследовали в лабораторных условиях. Для этого из кирпичей промышленного производства вырезали образцы в виде параллелепипедов размером 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 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.

Количественно интенсивность выгорания углерода оценивали с помощью гравиметрического метода по потере массы образцов. Глубину обезуглероженного слоя, име-

ющего характерный серовато-коричневый цвет, определяли на изломах образцов на основании замеров штангенциркулем.

Термогравиметрический анализ образцов огнеупоров выполняли на дериватографе LABSYS evo TG DTA DSC 1600 при нагреве до 1100 °С со скоростью 15 °С/мин. Химический состав огнеупоров определяли с применением рентгеновского дифрактометра XRD-6000.

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

В третьей главе исследованы кинетика физико-химических процессов высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров, минералогический и фазовый составы обезуглероженных слоев.

На рисунке 1, *а* представлен внешний вид изломов ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров марки APC-75H1 после высокотемпературной термической обработки в атмосфере воздуха в электрической печи сопротивления. Из рисунка 1, *а* видно, что поверхностные обезуглероженные слои имеют характерный серовато-коричневый цвет. Необезуглероженная сердцевина имеет черный цвет. На рисунке 1, *б* представлена зависимость глубины δ обезуглероженного слоя от температуры t и времени τ выдержки в атмосфере воздуха, построенная по результатам экспериментальных данных. Из рисунка 1, *б* 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.

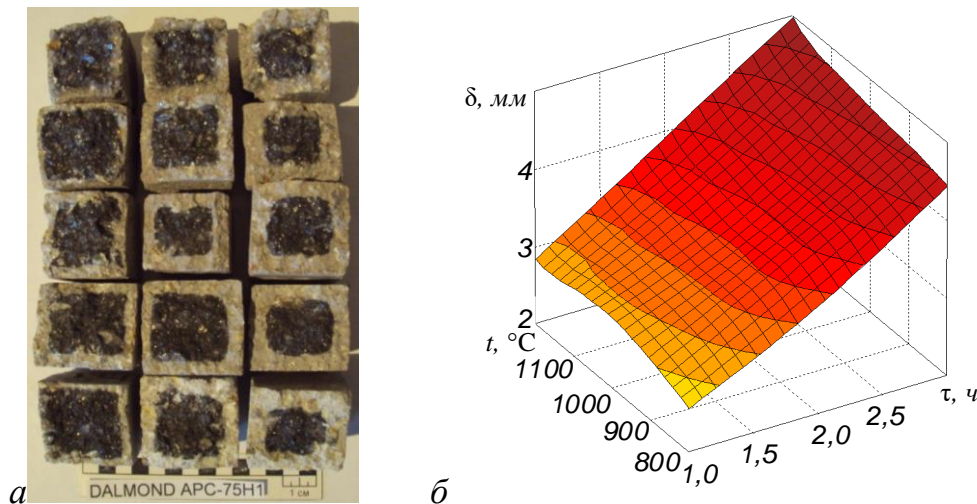


Рисунок 1 – Внешний вид (*а*) алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров после тепловой обработки (горизонтальные ряды слева направо время выдержки 1, 2 и 3 ч, вертикальные ряды сверху вниз температура выдержки 900, 1000, 1100, 1200, 1250 °С) и зависимость глубины обезуглероженного слоя от температуры и времени выдержки (*б*)

Для прогнозных расчетов получено соотношение, позволяющее определить толщину (δ , мм) обезуглероженного слоя огнеупора в зависимости от температуры и времени:

$$\delta = 0,5119 \cdot \exp(-494,0 / T) \sqrt{\tau}; R^2 = 0,72, \quad (1)$$

где T – температура, К; τ – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

Исследован фазовый и минералогический составы ковшевых алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров. Минеральный состав огнеупора представлен корундом, графитом,

кремнеземом и небольшим количеством шпинели 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 фактически следов. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтверждают визуальное определение обезуглероженных слоев по характерному серовато-коричневому цвету, необезуглероженные слои имеют черный цвет.

В качестве косвенной характеристики пористости огнеупоров исследовали их водопоглощение (рисунок 2). Установлено, 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 г/м^2 (на порядок меньше, чем у образцов, прошедших тепловую обработку). Для образцов нагретых до 1000°C и выдержанных в течение 120 мин в бескислородной атмосфере водопоглощение составляет 466 г/м^2 (на 10,5 % меньше, чем у образцов, прошедших аналогичную тепловую обработку в атмосфере воздуха).

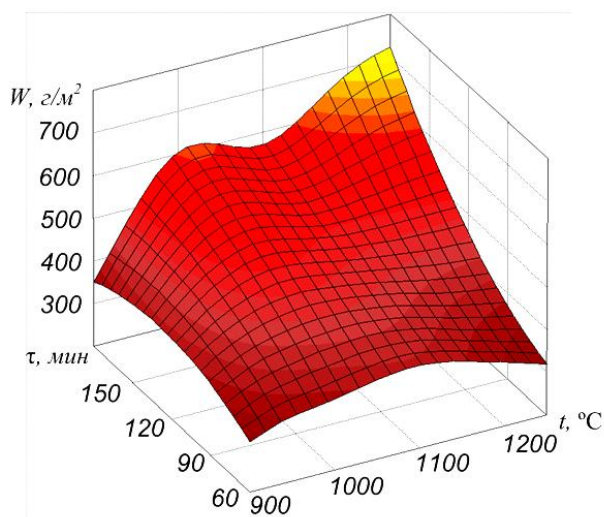


Рисунок 2 – Зависимость водопоглощения образцов огнеупора при различных режимах тепловой обработки

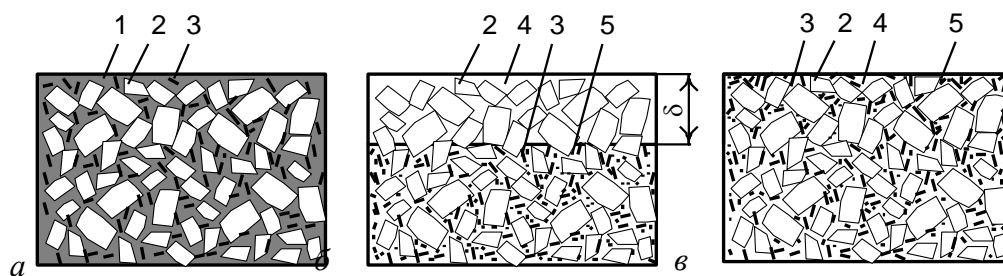
При тепловой обработке алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров водопоглощение, а соответственно и пористость зависят от множества факторов, однако основными процессами влияющими на них являются:

1. Деструкция связующего, придающего до тепловой обработки практически монолитную макроструктуру смолосвязанным огнеупорам. Связующее заполняет все поры между

зернами (MgO и Al_2O_3) огнеупорного материала и чешуйчатого графита (рисунок 3, а). Это обеспечивает крайне низкое водопоглощение огнеупору 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, можно выделить два его вида: выгорание чешуйчатого графита, имеющегося в исходном составе огнеупора, а также выгорание углеродистых (сажистых) частиц, образовавшихся в результате термического разложения связующего.



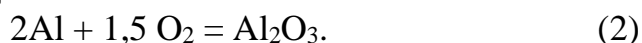
1 – связующее (смола и т.п.), 2 – зерна MgO и Al_2O_3 , 3 – чешуйчатый графит, 4 – поры, образовавшиеся в результате выгорания связующего и чешуйчатого графита, 5 – углеродистые частицы, образовавшиеся в результате термического разложения связующего

Рисунок 3 – Схематичное изображение макроструктуры смолосвязанных огнеупоров в исходном состоянии и после тепловой обработки

Роль состава атмосферы схематично проиллюстрирована на рисунке 3, б, в. При нагреве в кислородсодержащей атмосфере после тепловой обработки происходит образование обезуглероженного слоя глубиной δ , 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.

Для установления температурных интервалов интенсификации обезуглероживания промышленных периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых безобжиговых смолосвязанных огнеупоров марок АМС 78-8/7HG, RI-MC175LC (фирма RI); MayCarb 284-AX (фирма MAYERTON) проведен термогравиметрический анализ в атмосфере воздуха и кислорода. Результаты термогравиметрического анализа представлены на рисунке 4. Во всех случаях на дериватограммах проявляются три экзотермических эффекта А, В, С. На начальной стадии нагревания (в интервале температур 150 – 600 °С) наблюдается достаточно мощный экзотермический эффект А, сопровождающийся увеличением массы анализируемого вещества на 2 – 3 %. Этот эффект можно объяснить окислением присутствующего в огнеупорах антиоксиданта – порошкообразного алюминия по следующей реакции:



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

В процессе нагревания исследуемых огнеупоров в кислородсодержащей атмосфере происходит окисление углерода и частично летучих (часть летучих сгорает после их выделения в газовую фазу вне объема исследуемых образцов).

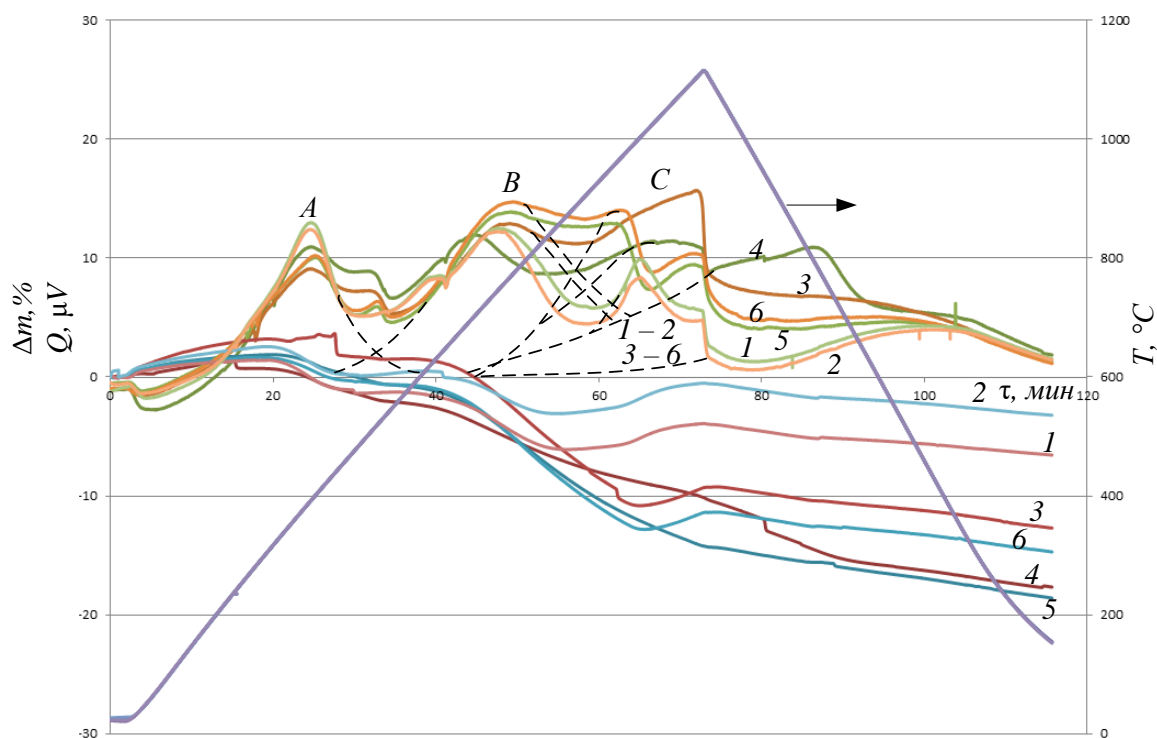
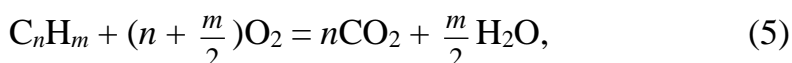


Рисунок 4 – Нагрев углеродсодержащих ковшевых огнеупоров в атмосфере воздуха 1 и 2 – огнеупор марки AMC 78-8/7HG (образец 1 и 2); 3 и 6 – огнеупор марки MayCarb 284-AX (образец 1 и 2); 4 и 5 – огнеупор марки RI-MC175LC (образец 1 и 2)

Процесс окисления происходит по реакциям:



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



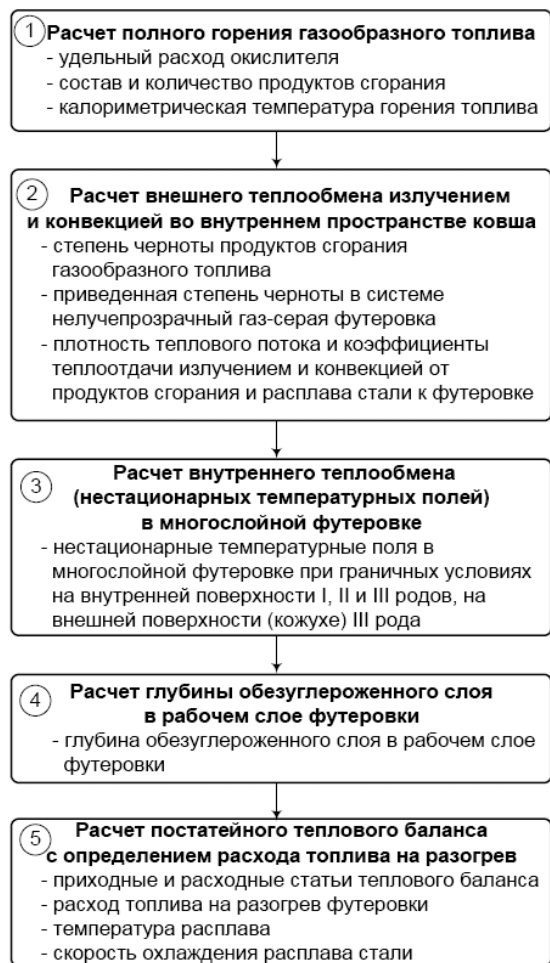
В результате проведенного термогравиметрического анализа установлено, что алюмопериклазоуглеродистые огнеупоры AMC 78-8/7HG, применяемые для футеровки стен сталеразливочных ковшей, содержащие 9,7 % C по сравнению с периклазоуглеродистыми RI-MC175LC и MayCarb 284-AX, применяемыми для футеровки шлакового пояса и содержащими 15,0 и 15,5 % C, характеризуются более высокой стойкостью к обезуглероживанию при нагреве до температур 1100 °C. Общая потеря массы исследуемых образцов составляет от 2 – 5 % (AMC 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 AMC 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 малообезуглероживающего первого разогрева ковша после ремонта для исследуемых огнеупоров рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 600 – 650 °C) выдержки футеровки.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию тепло-массообменных процессов и тепловой работы газовых стендов при разогреве алюмопериклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей.

Для комплексного исследования тепловой работы ковшевых футеровок и стенов разогрева в диссертации использована ранее разработанная детерминированная математическая модель, которая усовершенствована в целях расширения ее функционала и

возможностей исследовать тепловую работу газового стенов, оборудованного водоохлаждаемой горелкой (в конструкции которой предусмотрено обогащение кислородом дутья, подаваемого на горение), и процессов обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров рабочего слоя. Блочная структура математической модели представлена на рисунке 5.

Рисунок 5 – Структура блоков математической модели



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 про-

ведения 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 ковше. 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.

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

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{Q}{E - M_{ш}}, \quad (7)$$

где Q_p^H – теплота сгорания топлива (природного газа), МДж/м³; Q – суммарный объем газа, затрачиваемого на разогрев, м³; E – емкость ковша, т; $M_{ш}$ – масса шлака, т.

Если разогрев проводится при постоянном расходе топлива, то расчет можно сделать по следующему уравнению:

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{B\tau}{E - M_{ш}}, \quad (8)$$

где B – средний расход топлива за весь период разогрева, м³/ч; τ – время разогрева, ч.

Для электрических стенов сопротивления, получающих в последнее время все большее распространение, удельный расход можно определить по уравнению:

$$B_{\text{уд}} = \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{29,3} \frac{IU\tau}{(E - M_{\text{ш}})}, \quad (9)$$

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

По значению нового критерия тепловой эффективности конструкции стендов условно классифицированы на три уровня: с высокой тепловой эффективностью $B_{\text{уд}} = 5 - 20$ кг у.т./т, средней $B_{\text{уд}} = 20 - 35$ кг у.т./т и низкой $B_{\text{уд}}$ более 35 кг у.т./т.

С использованием комплексной детерминированной математической модели проведено исследование влияния емкости (геометрических размеров) ковша на технико-экономические показатели работы стенда. Многовариантные расчеты осуществляли на примере разогрева сталеразливочных ковшей номинальной емкостью E , равной 90, 130, 220, 350 и 480 т, имеющих геометрические размеры, представленные в таблице 2. Рабочий слой футеровки выполнен из алюмопериклазоуглеродистого смолосвязанного огнеупора марки АРС-75Н1; арматурный – из огнеупора марки МКРКП-45; между рабочим и арматурным слоями находится буферная засыпка марки ВГБМ-80; теплоизоляционный слой выполнен из материала МКРКГ-400; кожух ковша из низколегированной стали. Принимали, что разогрев футеровки осуществляли на оборудованном теплоизолированной крышкой стенде, отапливаемом природным газом следующего химического состава: 91,50 % CH_4 ; 3,07 % C_2H_6 ; 1,73 % C_3H_8 ; 0,9 % C_4H_{10} ; 2,34 % N_2 ; 0,45 % CO_2 ; 0,01 % 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 1,1, а температуру воздуха, подаваемого на горение, 10, 200 и 400 °С.

Таблица 2 – Геометрические размеры и конструкция футеровки сталеразливочных ковшей различной емкости

E , т	$M_{\text{ш}}$, т	D_1 , мм	D_2 , мм	h , мм	δ_1 , мм	δ_2 , мм	δ_3 , мм	δ_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. $M_{\text{ш}}$ – масса шлака; D_1 и D_2 – внутренний и наружный диаметры ковша; δ_1 , δ_2 , δ_3 и δ_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. Время τ разогрева предварительно высушенной футеровки приняли 24 ч. Температура греющей среды изменялась линейно от 450 до 1250 °С со скоростью 33,3 °С/ч. В результате многовариантных расчетов для 45 различных режимов разогрева сталеразливочных ковшей установлено, что тепловая эффективность и экономичность стенов разогрева зависят прямо пропорционально от емкости сталеразливочных ковшей для всех значений температуры подогрева воздуха и зазоров между крышкой и ковшом. Меньшие значения удельных расходов топлива характерны для ковшей большей емкости. В таких условиях важное значение имеют объем (или масса, влияющая на теплосодержание) футеровки и площадь поверхности кожуха, предопределяющая теплопотери в окружающую среду. На рисунке 6 представлены зависимости удельных площади $S_{\text{уд}}$, м²/т, поверхности кожуха и объема $V_{\text{уд}}$, м³/т, т.е. отношения площади поверхности кожуха и объема футеровки к номинальной емкости ковша. Видно, что для ковшей исследуемых емкостей удельная

площадь снижается в 2 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.

Установлено наличие характерной зависимости КПД стенда от скорости разогрева футеровки: зависимость имеет экстремальный характер, причем для ковшей различной емкости экстремум имеет различное значение (рисунок 7). При увеличении скорости разогрева от 30 до 80 – 150 °С/ч (в зависимости от емкости ковша) наблюдается рост КПД стенда, далее при более высоких скоростях разогрева КПД снижается.

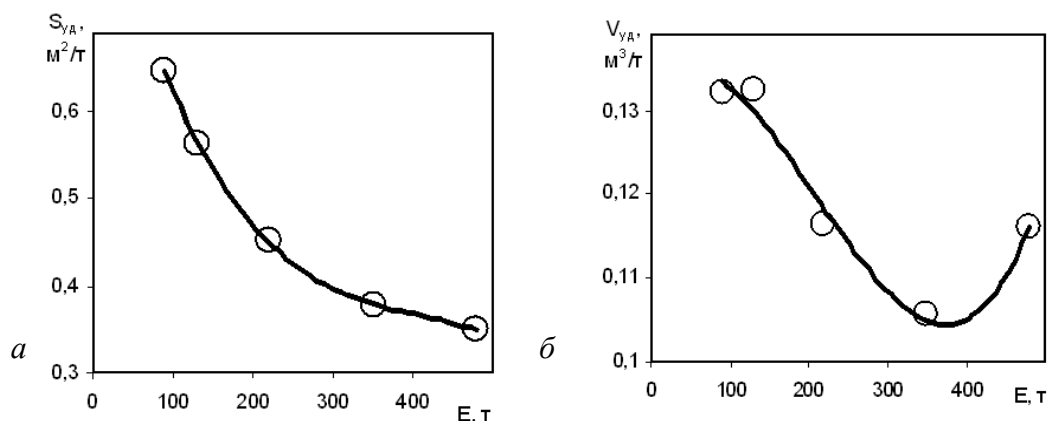


Рисунок 6 – Изменение удельных площади поверхности кожуха (а) и объема футеровки (б) в зависимости от емкости ковша

С применением математической модели проведено исследование эффективности совместного использования различных энергосберегающих мероприятий. Исследуемые варианты нагрева и их основные параметры представлены в таблице 3 и на рисунке 8. Анализ полученных результатов показывает, что наименее экономичным является нагрев 1. При отсутствии теплоизолированной крышки, подогрева воздуха и обогащения дутья кислородом КПД стенда составил 21,7 %, средний расход топлива на разогрев равен 496 м³/ч, а общий расход топлива – 11902 м³. При максимальных расходах топлива не более 450 – 500 м³/ч (на рисунке 8 показан штриховой линией) на эксплуатируемых в настоящее время стендах с постоянной скоростью увеличения температуры поверхности футеровки разогрев по такому варианту возможен только первые 13 – 14 ч, при этом температура поверхности составит порядка 800 °С.

Для дальнейшего сохранения постоянной скорости разогрева расхода топлива B , м³/ч, тепловой мощности стенда будет недостаточно. Потери тепла излучением через открытое пространство ковша достигают 26,4 %. Подогрев воздуха до температуры 400 °С (нагрев 5) повышает КПД до 28,1 % и несколько снижает расход топлива, однако это обеспечит нагрев футеровки с постоянной скоростью только до 950 °С.

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 м³/ч, а общий расход – до 5006 м³, т.е. в 2,4 раза меньше, чем при нагреве 1. Основным энергосберегающим эффектом достигается за счет ликвидации расходной статьи $Q_{изл}$. Применение теплоизолированной крышки, но с зазором между ковшем, также достаточно эффективно, однако потенциал энергосбережения зависит от зазора h . Так при величине $h = 50$ мм потери тепла излучением составляют порядка 1 %, а при $h = 300$ мм – возрастают до 7 – 8 %.

Таблица 3 – Параметры и характеристики исследуемых вариантов разогрева

Нагрев	Состав окислителя, %		h, мм	t _{ок} , °C	КПД, %	Вср, м ³ /ч	G _г /G _к , м ³	Статьи теплового баланса, %								
	N ₂	O ₂						Приход			Расход					
								Q _{тх}	Q _{ок}	Q _{об^х}	Q _{акк·ф}	Q _д	Q _{теп}	Q _{изл}	Q _{вод}	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_{тх} – химическое тепло топлива; Q_{ок} – физическое тепло окислителя; Q_{об^х} – химическое тепло обезуглероживания огнеупора; Q_{ак.ф} – тепло, аккумулируемое футеровкой; Q_д – потери тепла с уходящим дымом; Q_{теп} – потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду; Q_{изл} – потери тепла излучением через зазор между крышкой станда и ковшом; Q_{вод} – потери тепла с охлаждающей водой; ΣQ – сумма остальных расходных статей (неучтенные потери), включающая потери тепла в результате химического недожога и пр.

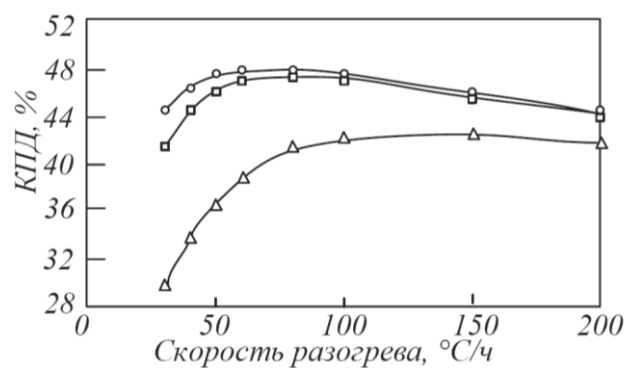
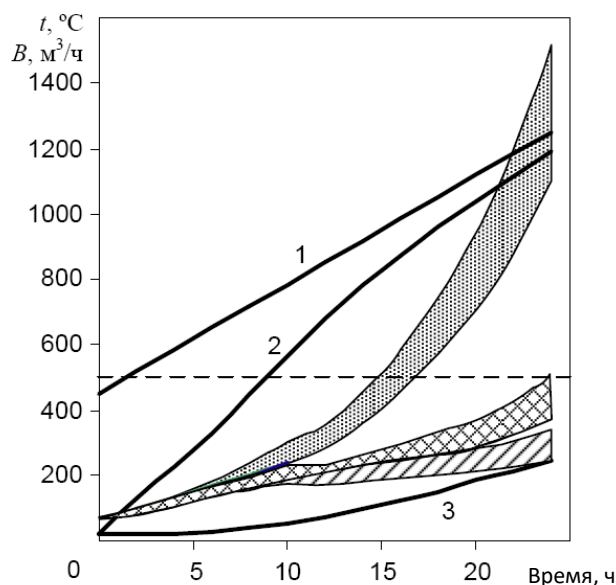


Рисунок 7 – Зависимость КПД станда от скорости разогрева при емкости ковша 90 (Δ), 350 (□) и 480 т (○)

Для нагрева 21 без подогрева воздуха и при величине $h = 300$ мм КПД составляет 42,6 %, средний расход топлива равен 251 м³/ч, а общий расход – 6011 м³, это почти в 2 раза меньше, чем при варианте 1. При такой конструкции станда тепловой мощности будет достаточно, чтобы разогреть футеровку до 1200 °C с постоянной скоростью. Подогрев воздуха способствует повышению тепловой эффективности стандов, однако его эффект гораздо меньше, чем от применения теплоизолированных крышек.

Так для всех исследованных вариантов нагрева подогрев воздуха от 10 до 400 °С повышает КПД не более чем на 14 – 15 %, при этом экономия топлива достигает порядка 30 %.



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

Обогащение дутья кислородом при условии применения водоохлаждаемой горелки, даже в случае подогрева окислителя до температуры 400 °С (нагрев 30), по энергоэффективности уступает нагреву 10. Коэффициент полезного действия первого составляет 62,4 %,

второго – 65,7 %. Это связано со значительными потерями тепла с водой (примерно 15 %). Однако, если применять обогащение дутья кислородом в комплексе с горелками, в которых отсутствуют водоохлаждаемые элементы (нагрев 31), то это обеспечивает существенную экономию топлива. Целесообразность обогащения дутья кислородом зависит от экономических факторов, а его эффективность максимальна в случаях применения горелок без водоохлаждаемых элементов.

В пятой главе представлены результаты разработки 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 результате статистической обработки массива данных по стойкости огнеупоров различных производителей установлено, что сокращение времени «горячего» резервирования ковшей перед приемом расплава и продолжительности разогрева футеровки, 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.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований 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.

В таблице 4 представлены сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева. Малообезуглероживающий режим обеспечивает более экономичную тепловую работу станда. При его реализации удельный расход условного топлива снижается с 19,0 до 15,7 кг у.т./ т стали. Разработанный малообезуглероживающий режим рекомендован к практическому применению. Прогнозируемое увеличение стойкости футеровки – на одну плавку. Расчетный ожидаемый экономический эффект от увеличения стойкости футеровки 350-т сталеразливочных ковшей на одну плавку в ценах на огнеупоры в 2022 г. составляет 12 млн. руб.

Таблица 4 – Сводные данные сравнительного анализа существующего и предлагаемого режима разогрева

Параметр	Режимы		Разность (С – М)
	существу- ющий(С)	малообезуглеро- живающий(М)	
Продолжительность, ч	20	20,5	+0,5 ↑
Температура: – поверхности футеровки	1199	1182	– 17 ↓
– на стыке рабочего и арматурного слоев	918	815	– 103 ↓
– кожуха	118	105	– 13 ↓
– максимальная греющей среды	1270	1275	+ 5 ↑
Общий объем Q_r природного газа, м ³	4619	3821	– 798 ↓
Общий объем кислорода, м ³	4619	3821	– 798 ↓
Глубина обезуглероженного слоя δ , мм	7,90	6,36	– 1,54 ↓
Стойкость ковша, плавов (наливов)	89	90	+ 1 ↑
Параметры теплового баланса, %:			
– химическое тепло топлива Q_r^x	96,9	97,0	+ 0,1
– физическое тепло окислителя $Q_{ок}$	0,7	0,7	0
– химическое тепло обезуглероживания огнеупора $Q_{об}^x$	2,4	2,3	– 0,1
– потери тепла теплопроводностью $Q_{теп}$	3,0	3,4	+ 0,4 ↑
– потери тепла с уходящим дымом Q_d	43,6	39,7	– 3,9 ↓
– тепло, аккумулируемое футеровкой $Q_{ак.ф}$	40,5	44,3	+ 3,8 ↑
– потери тепла излучением $Q_{из}$	5,0	3,9	– 1,1 ↓
– потери тепла с охлаждающей водой $Q_{вод}$	1,9	2,3	+ 0,4 ↑
– неучтенные потери $Q_{н.п}$	6,0	6,4	+ 0,4 ↑
Расход топлива B , м ³ /ч: – максимальный	437	455	+ 18 ↑
– минимальный	59	59	0
– средний за период разогрева	234	193	– 41 ↓
Удельный расход условного топлива $B_{уд}$, кг у.т./ т стали	19,0	15,7	– 3,3 ↓
Затраты топлива и кислорода на реализацию режима, руб.	38218	31615	– 6603 ↓

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

Для оценки эффективности применения защитных покрытий для алюмопериклазо-углеродистых футеровок 350-т ковшей ККЦ-2 проведена серия промышленных экспериментов. Для исследований использован состав покрытия на основе молотого силикатного стекла фракции менее 1 мм и связующего жидкого стекла. Покрытие наносили на половину поверхности полнопрофильного кирпича. Кирпич с помощью стального подвеса крепили на внутренней поверхности футеровки. Далее ковш разогревали на стенде в соответствии с действующим температурным режимом. На рисунке 9 представлен внешний вид кирпича после охлаждения. Из рисунка 9 видно, что левая половина огнеупора, защищенная покрытием, имеет характерный черный цвет, однако присутствуют участки серовато-коричневого цвета, свидетельствующие о локальном обезуглероживании. Глубина обезуглероженного слоя в области таких участков составляет 1,0 – 1,5 мм.



Рисунок 9 – Характерный внешний вид алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров после разогрева по действующим режимам (левая половина защищена покрытием)

Правая половина огнеупора не защищенная покрытием по всей поверхности имеет характерный серовато-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 перспективности применения покрытий на основе силикатного и жидкого стекла для защиты алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров от обезуглероживания при первом разогреве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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°C. 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 малообезуглероживающего первого разогрева ковшей после ремонта для исследуемых марок огнеупоров рекомендуются температурные режимы, включающие низкотемпературные (до 500–600°C) 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 ковш. 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 разлива 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 течение 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 обезуглероживающего 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 стенов. 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».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. Протопопов, Е.В. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров / Е.В. Протопопов, М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. – № 12. – С. 24 – 28.

4. 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.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science:

1. 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. – Т. 44. – № 12. – С. 879 – 882.

2. Yakushevich, N.F. Decarburization of Periclase-Carbon and Aluminum-Periclase-Carbon Ladle Refractories / N.F. Yakushevich, E.M. Zapol'skaya, M.V. Temlyantsev [etc.] // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – P. 736 – 741.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и трудах научно-практических конференциях:

1. Красильников, В.В. Повышение тепловой эффективности стенов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей / В.В. Красильников, Д.А. Никитин, Е.М. Запольская. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. – С. 388 – 396.

2. 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: ИЦ СибГИУ, 2021. – С. 396 – 400.

3. Протопопов, Е.В. Кинетическая модель рафинирования расплава при продувке нейтральным газом в сталеразливочном ковше / Е.В. Протопопов, М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская, О.А. Полях. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Междунар. науч.-практ. конференции. В 2-х частях. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. – С. 78 – 81.

4. 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 Междунар. научно-практической конференции. В 2-х ч. – Новокузнецк, 2021. – С. 122 – 126.

5. Протопопов, Е.В. Перемешивание расплава при продувке инертным газом в агрегатах ковш-печь / Е.В. Протопопов, Л.В. Думова, М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2021. – № 24. – С. 76 – 83.

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

7. Григорьев, А.В. Исследование влияния температурных режимов разогрева на энерготехнологическую эффективность стенов тепловой подготовки футеровок сталеразливочных ковшей / А.В. Григорьев, Е.М. Запольская. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. – С. 238 – 242.

8. Григорьев, А.В. Анализ динамики показателей теплового состояния футеровки сталеразливочных ковшей при высокотемпературном разогреве / А.В. Григорьев, Е.М. Запольская. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. – С. 247 – 252.

9. 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 СибГИУ. – 2019. – № 2 (28). – С. 7 – 10.

10. 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. – 2017. – С. 371 – 373.

11. Запольская, Е.М. К вопросу о разработке универсального показателя тепловой эффективности стенов разогрева футеровок металлургических ковшей / Е.М. Запольская, А.В. Феоктистов, М.В. Темлянцев. – В кн.: Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2017) с международным участием. – 2017. – С. 45 – 47.

12. 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.

13. Запольская, Е.М. Разработка показателя тепловой эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е.М. Запольская. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. – С. 129 – 132.

14. 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 сталеплавыльщиков и производителей металла. – 2016. – С. 388 – 393.

15. 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.

16. Запольская, Е.М. Исследование влияния снижения тепловых потерь через футеровку металлургических ковшей на энерготехнологическую эффективность стенов высокотемпе-

ратурного разогрева / Е.М. Запольская, К.Е. Максакова, К.С. Коноз [и др.]. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. – С. 62 – 67.

17. Темлянцева, М.В. Повышение тепловой эффективности стенов суши и разогрева сталеразливочных ковшей / М.В. Темлянцева, Е.М. Запольская, Е.Н. Темлянцева. – В кн.: Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2014. – С. 59 – 66.

18. Темлянцева, М.В. Обезуглероживание алюмопериклазоуглеродистых огнеупоров при первом разогреве ковшевых футеровок / М.В. Темлянцева, 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 В.Е. Грум-Гржимайло. – 2014. – С. 435 – 440.

19. Темлянцева, М.В. Повышение энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок металлургических ковшей / М.В. Темлянцева, Е.М. Запольская, В.В. Стерлигов [и др.] // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. – 2014. – № 33. – С. 38 – 44.

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

21. Запольская, Е.М. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е.М. Запольская, М.В. Темлянцева, К.Е. Костюченко // Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение. – 2013. – № 15. – С. 128 – 134.

22. Матвеев, М.В. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / М.В. Матвеев, М.В. Темлянцева, Е.М. Запольская, К.Е. Костюченко // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. – 2013. – № 31. – С. 31 – 44.

23. Запольская, Е.М. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева / Е.М. Запольская, М.В. Темлянцева, К.Е. Костюченко // Вестник СибГИУ. – 2013. – № 2 (4). – С. 28 – 32.

24. Темлянцева, М.В. Исследование газообразных выбросов вредных веществ при разогреве периклазоуглеродистых ковшевых футеровок / М.В. Темлянцева, Н.В. Темлянцева, Е.М. Запольская // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. – 2012. – № 29. – С. 147 – 151.