

**19–20 МАЯ
2022 ГОДА**

МОСКВА, НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ **ОГНЕУПОРЩИКОВ И МЕТАЛЛУРГОВ**



МИСИС 
Университет науки и технологий

 **МАГНЕЗИТ**
вместе создавать

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА —
ЖУРНАЛЫ «НОВЫЕ ОГНЕУПОРЫ»,
«METAL RUSSIA», ПОРТАЛ НИТУ «МИСИС»,
«БРЕНД-СЕРВИС. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ»
ИА «МЕТАЛЛ-КУРЬЕР»

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Григорьев А. С., Данильченко С. В., Дмитриев А. И., Заболотский А. В., Мигашкин А. О., Турчин М. Ю., Хадыев В. Т., Шилько Е. В. Компьютерное моделирование влияния вспомогательных слоев футеровки сталеразливочного ковша на локализацию и направление роста термических трещин.....5
- Данильченко С. В., Заболотский А. В., Мигашкин А. О., Турчин М. Ю., Хадыев В. Т. О влиянии размерного фактора на разрушение футеровки.....5
- Кормина И. В., Кедин Н. А. Разработка и внедрение отечественных добавок для интенсификации процесса агломерации по требованиям заказчика.....6

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Перепелицын В. А., Федоров С. А. Использование техногенных отходов из плавленных силикатно-глиноземистых продуктов для изготовления огнеупорных бетонов.....7
- Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Перепелицын В. А., Федоров С. А. Состояние пылеобразных отходов из плавленных глиноземистых продуктов и их использование.....8
- Турковский В. А., Кашеев И. Д., Глебова А. А., Павлова И. А., Фарафонтова Е. П. Кыштымский каолин в производстве керамики.....9

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

- Макаров В. Н., Угольников А. В., Давыдов С. Я., Филатов А. М. Модификация технологии классификации мелкодисперсных отходов для производства огнеупоров.....10
- Манашев И. Р., Ложкин И. А., Манашева Э. М., Макарова И. В. СВС упрочняющих нитридыкремниевых добавок для леточных масс при утилизации циклонной пыли ферросилиция.....11
- Пицик О. Н., Киселева Е. А., Найман Д. А. Освоение технологии производства крупноформатных термостойких периклазовых огнеупоров для футеровки свода электропечи.....12
- Соколов В. А., Киров С. С. Оценка системы пылегазоочистки при плавке хромсодержащих огнеупоров в электродуговой печи.....13

ТЕПЛОТЕХНИКА

- Дзюзер В. Я., Гизатуллина Ю. В. Разработка энергоэффективного регенератора стекловаренной печи.....14
- Дзюзер В. Я., Паньков Д. В. Расчет и конструирование теплоизолированного свода стекловаренной печи.....14

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

- Абызов В. А., Посаднова Н. Е. Фосфатное связующее и жаростойкий газобетон на основе дисперсных отходов шамотного производства.....15
- Абызов В. А., Черногорлов С. Н. Жаростойкий ячеистый бетон на модифицированном добавкой шлака алюмини-термического производства глиноземистом вяжущем.....16
- Антипов М. С., Бажина А. Д., Константинов А. С., Бажин П. М. Разработка металлокерамического материала

- на основе карбида титана с химически активной матрицей для повышения стойкости шиберных затворов.....17
- Вартанян М. А., Макаров А. В., Попова Н. А. Структура и фазовый состав керамики на основе SiO_2 с добавкой пылеобразных отходов литейного производства.....18
- Красный Б. Л., Иконников К. И., Бернт Д. Д., Лемешев Д. О., Сизова А. С., Галганова А. Л., Родимов О. И. Влияние способов сушки на свойства элемента, изготовленного на основе алюмосиликатных волокон, для фильтрации горячих газов.....19
- Лебедев Н. С. Термостойкая керамика кордиеритового и муллитокордиеритового составов.....20
- Наревич Я. О. Шликер для получения керамических изделий сложной объемной формы.....20
- Перепелицын В. А., Земляной К. Г. Теоретические аспекты износоустойчивости огнеупоров.....21
- Платонов А. А., Меркурьева С. Б., Чайка Е. Ф., Михайловская Л. М. Внедрение и использование метода раскалывания клином при испытании огнеупоров.....22
- Руденок Л. П., Хорев В. А. Получение композиционного материала на основе плакированного порошка cBN для режущего инструмента.....23
- Соков В. Н., Алматов А. С., Рамазанов Е. А. Керамические альгидидные кровельные гранулы из горных пород.....24
- Соков В. Н., Сокова С. Д. Термодинамика самоуплотняющихся масс при воздействии токов промышленной частоты.....25
- Суворов С. А., Козлов В. В., Иванов А. В. Разработка системы прогноза взаимодействия сталеплавильных шлаков и огнеупорных материалов в рамках шестикомпонентной системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$26
- Уразаева Э. М., Руми М. Х., Мансурова Э. П., Ирматова Ш. К., Зуфаров М. А., Нурматов Ш. Р., Файзиев Ш. А. Особенности фазового состава обмурочных материалов на фосфатных связках.....27
- Фещенко Р. Ю., Ерохина О. О., Пирогова Н. А. Повышение окислительной стойкости углеграфитовых изделий в высокотемпературных металлургических агрегатах.....28
- Хабиров Р. П., Гудыма Т. С., Черкасова Н. Ю., Масс А. В. Влияние TiB_2 и ZrB_2 на структуру и плотность композиционной B_4C -керамики.....28
- Хазин М. Л., Апакашев Р. А., Давыдов С. Я. Способ синтеза алюмоматричных композиционных материалов, дисперсно-армированных частицами керамики.....30
- Хорев В. А., Курочкин С. Ю., Румянцев В. И., Фищев В. Н. Влияние вида углеродной компоненты на работоспособность твердосплавных подшипников WC-Ni-C30
- Ярушина Т. В., Мигашкин А. О., Платонов А. А., Ерошин М. А. Повышение устойчивости MgO-C -огнеупоров к циклическим температурным воздействиям.....31
- Ярушина Т. В., Платонов А. А., Ерошин М. А., Мигашкин А. О. Огнеупоры Группы Магнезит нового поколения — периклазошпинелидные изделия с фрагментированной микроструктурой.....32
- Ярушина Т. В., Платонов А. А., Ерошин М. А., Мигашкин А. О. Периклазоуглеродистые огнеупоры с заданными свойствами для футеровки сталеразливочных ковшей.....33

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ
ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ
И НАПРАВЛЕНИЕ РОСТА ТЕРМИЧЕСКИХ ТРЕЩИН**(✉)
E-mail: grigoriev@ispms.ru© А. С. Григорьев¹ (✉), С. В. Данильченко², д. ф.-м. н. А. И. Дмитриев¹,
к. т. н. А. В. Заболотский², А. О. Мигашкин², к. т. н. М. Ю. Турчин², В. Т. Хадыев²,
д. ф.-м. н. Е. В. Шилько¹¹ ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН»
(ИФПМ СО РАН), г. Томск, Россия² ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

В процессе эксплуатации многослойная футеровка сталеразливочного ковша находится в условиях сложного теплообмена с внутренней и внешней средой. В частности, рабочий слой футеровки испытывает циклические нагревы и охлаждения, обусловленные особенностями эксплуатации агрегата, причем интервал изменения температуры может достигать 800 °С согласно технологическим инструкциям (рабочая температура составляет до 1700 °С, при этом возможны межплавочные охлаждения до 900 °С). При этом внешняя поверхность кожуха разогревается до 250–350 °С и находится в условиях интенсивного теплообмена с внешней средой путем конвекции и излучения. Наружные конструкции кожуха ковша (цапфы и бандажи) со значительной площадью поверхности выступают в качестве «радиаторов охлаждения» агрегата, приводящих к значительному локальному снижению температуры кожуха. Согласно наблюдениям за характером разрушения футеровки сталеразливочных ковшей, образующиеся при этом трещины часто локализируются вблизи зоны крепления цапф к кожуху ковша. Цель проведенного численного эксперимента — выяснение особенностей термомеханических нагрузок цапфенной зоны ковша и анализ их влияния на направление развития трещин в этой зоне.

Для расчета температурного поля и поля механических напряжений использовали метод конечных эле-

ментов (МКЭ), реализованный в ПО «АНСИС», и метод подвижных клеточных автоматов (одна из разновидностей метода дискретных элементов), разработанный в виде компьютерной программы ИФПМ СО РАН и позволяющий непосредственно рассчитывать траектории возникающих трещин. В качестве критерия роста трещин и определения их направления использовали деформационный критерий для МКЭ и критерий Друкера–Прагера для метода подвижных клеточных автоматов.

Установлено, что при значительном износе теплоизоляционного слоя между корпусом ковша и арматурным слоем футеровки температурное поле тыльной поверхности, в том числе рабочего слоя футеровки, имеет выраженную зональность, причем область проекции цапфы может иметь температуру на 100–150 °С ниже, чем в соседних зонах. Одновременно отсутствие буферного слоя между рабочим и арматурным слоями футеровки приводит к возникновению плотного механического контакта этих слоев и к локальному усилению термомеханических напряжений. При этом поле напряжений может приобретать конфигурацию, приводящую к диагональному растрескиванию изделий рабочего слоя футеровки.

Работа по моделированию методом подвижных клеточных автоматов выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-19-00688.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРНОГО ФАКТОРА НА РАЗРУШЕНИЕ ФУТЕРОВКИ(✉)
E-mail: azabolotskiy@magnezit.com© С. В. Данильченко, к. т. н. А. В. Заболотский (✉), А. О. Мигашкин, к. т. н. М. Ю. Турчин,
В. Т. Хадыев

ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Размерный фактор играет существенную роль в процессах износа, особенно катастрофического разрушения футеровки металлургических агрегатов; размерным фактором могут быть объяснены локализации возникающих трещин. Например, в агрегатах большой вме-

стимости симметричные механические или термомеханические нагрузки приводят к появлению множества трещин, каждая из которых приурочена к собственной зоне критических напряжений. Одновременно в аналогичных условиях в агрегатах малой вместимости про-

исходит наложение полей напряжений и деформаций; формируется суммарное поле напряжений, приводящее к развитию одной результирующей трещины. Другой причиной образования одиночных трещин в таких агрегатах является возможность стока энергии упругих деформаций от разных зон в одну формирующуюся трещину при небольшом расстоянии до нее.

Ранее фиксировали влияние расстояния между напряженными участками в материалах на картину напряжений и формирование трещин, однако количественную оценку этого значимого фактора не проводили. Поэтому для анализа картины разрушения футеровки теплового агрегата в Группе Магнезит проведен ряд исследований, направленных на создание количественной модели влияния размерного фактора на формирование трещин в футеровке. Было проведено исследование формирующихся макроскопических полей напряжений в зависимости от упругих свойств материалов и геометрических размеров объектов.

Расчетным путем установлено, в частности, что суммарное поле напряжений образуется при больших расстояниях между зонами приложения нагрузки при малых величинах коэффициента Пуассона (хрупкие материалы более подвержены взаимному влиянию нагруженных зон друг на друга), а также чувствительно к площади участка приложения нагрузки и форме на-

груженной зоны. Геометрическая форма объекта также значительно влияет на возникающее поле напряжений. Зависимости от модуля Юнга в проведенных расчетах выявлено не было. Применение полученных данных к анализу трещинообразования в футеровке показало, что взаимное влияние напряженных зон не распространяется на расстояния более нескольких метров. При этом в агрегатах малой вместимости расстояния между напряженными зонами составляют 2–3 м, а при большей вместимости могут превышать, например, 5 м для сталеразливочных ковшей и более 10 м для печей непрерывного действия.

Были рассчитаны напряжения и прогнозируемые направления роста трещин для мезоскопического уровня внутренней структуры огнеупора (на уровне зерен, пор и связующей матрицы). Установлено, что направление роста трещин может варьироваться в широких пределах — от параллельного относительно прикладываемой нагрузки до перпендикулярного. При этом на направление формирующейся трещины влияют как расстояние между элементами структуры (порами или зернами), так и упругие свойства огнеупора, которые в общем случае являются функцией температуры. Дальность действия напряженных зон соответствует порядку размера элементов структуры, не превышая их размера более чем в 2–4 раза.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ЗАКАЗЧИКА

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

(✉)

E-mail: n_kedin@ppus.org

© И. В. Кормина, Н. А. Кедин (✉)

ООО «Полипласт-УралСиб», г. Первоуральск Свердловской обл., Россия

В ноябре 2020 г. на базе завода «Полипласт-УралСиб» создан Научно-технический центр (НТЦ) по разработке связующих для металлургической, горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности. Деятельность центра направлена на разработку инновационных технологических добавок с последующим внедрением их в производство.

В состав НТЦ входят три лаборатории, возможности которых позволяют моделировать технологическую цепочку заказчика, отслеживать изменение разных функциональных свойств добавок и их поведение в конечном продукте. Работа центра обеспечивает полное технологическое сопровождение заказчика — от консультирования на стадии разработки до контроля показателей в производственном цикле. Одним из важнейших направлений является разработка добавок для агломерации.

Окомкование шихты имеет особое значение в технологии агломерации, так как от газопроницаемости слоя аглошихты зависят скорость фильтрации газа, интенсивность теплообмена и процесса спекания, удельная производительность агломашины и качество агломерата, а также количество выбросов экологически вредной пыли. Слой плохо окомкованной шихты об-

ладает высоким газодинамическим сопротивлением и является неоднородным: неодинаковый градиент давлений газа по высоте, неудовлетворительная сегрегация частиц и низкая прочность гранул в зонах переувлажнения, сушки и высокотемпературного нагрева.

Специально для процессов окомкования агломерационной шихты в НТЦ «Полипласт-УралСиб» были разработаны серии сухих и жидких технологических добавок, действие которых в зависимости от поставленных заказчиком целей направлено на интенсификацию процесса спекания: улучшение комкуемости аглошихты, повышение однородности граулометрического состава, увеличение прочности гранул. Технологические добавки, разработанные компанией «Полипласт-УралСиб», имеют разную основу и выпускаются в виде порошка и водного раствора. Они являются синтетическими связующими в чистом виде, а также на минеральной основе. Обладают стабильным контролируемым составом и дополнительными функциональными свойствами.

Испытания добавок проводили на шихтовых материалах нескольких металлургических комбинатов в соответствии с технологическими условиями конкретно аглопроизводства (расход компонентов, влажность

шихты, высота слоя, разрежение и т. д.). Лаборатория агломерации НТЦ «Полипласт-Уралсиб» располагает комплексом оборудования для проведения спеканий агломерата с высотой слоя аглошихты до 600 мм, а также для анализа свойств агломерата согласно ГОСТ 25471–82 и ГОСТ 15137–77.

В 2021 г. для улучшения качественных и количественных показателей производства агломерата за счет увеличения прочности гранул в НТЦ обратился один из металлургических комбинатов. Результатом этого сотрудничества стали промышленные испытания, направленные на производство агломерата с использованием сухой полимерной связующей добавки. Работа проводилась в несколько этапов: 1 — лабораторные исследования и разработка состава; 2 — испытание состава в ходе спекания в агломерационной лаборатории

заказчика; 3 — отработка технологии производства агломерата с использованием полимерного связующего (9 сут); 4 — подтверждение технико-экономических показателей агломерационного процесса, достигнутых в ходе третьего этапа (30 сут). По результатам промышленных испытаний зафиксирована эффективность применения связующего марки Полипласт ТД 030.000 СВ при спекании агломерата с увеличением линейной скорости спекания и скорости движения спекательных тележек до 5,4 отн. %, выхода годного агломерата до 7,1 отн. %, холодной и горячей прочности агломерата соответственно на 3,4 и 4,6 абс. %.

В настоящее время на предприятии заказчика обсуждаются возможности проведения модернизации для подачи полимерного связующего на постоянной основе.

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ



E-mail: davidovtrans@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ИЗ ПЛАВЛЕННЫХ СИЛИКАТНО-ГЛИНОЗЕМИСТЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ

© Д. Т. Н. С. Я. Давыдов¹ (✉), Д. Х. Н. Р. А. Апакашев¹, Д. Т. Н. В. А. Перепелицын³, С. А. Федоров^{1, 2}

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

² ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН», Екатеринбург, Россия

³ ООО НПО «ВостИО-Урал», пос. Шабровский Свердловской обл., Россия

В качестве вяжущих для жаростойких и огнеупорных бетонов используют глиноземистые и высокоглиноземистые цементы, получаемые из дорогостоящего сырья — бокситов и глинозема. Для снижения стоимости цемента используют шлаки алюминотермического производства ферросплавов, богатые глиноземом, значительное количество которых имеется на Ключевском заводе ферросплавов. Перспективной разновидностью таких шлаков с точки зрения получения цемента является шлак безуглеродистого феррохрома (продукты ППГ-30 и ППГ-50), позволяющие получать вяжущие материалы с наименьшими затратами. Плавленные глиноземистые продукты (ППГ-30 и ППГ-50) содержат фракции мельче 200 и мельче 80 мм, их огнеупорность варьируется в пределах 1450–1750 °С.

НПО «ВостИО-Урал» получает от Ключевского завода ферросплавов техногенное сырье, востребованное предприятиями черной и цветной металлургии, огнеупорной промышленности, а также для производства цемента. Результаты исследований образцов ППГ-30 и ППГ-50 по истиранию показали, что по шкале абразивности горных пород (по Л. И. Барону) образцы ППГ-50 относятся к классу VI «повышенной абразивности пород», ППГ-30 — к классу VII «высокоабразивные породы». По коэффициенту крепости (по М. М. Прото-

дьяконову) образцы относятся к следующим категориям: проба ППГ-50 — к категории III «крепкие», проба ППГ-30 — к категории IV «довольно крепкие».

Микрофотографии неполированных и полированных спиленных поверхностей образцов вяжущих ППГ-30 и ППГ-50, полученных с промышленной площадки НПО «ВостИО-Урал», показали, что характер поверхности спиленных образцов специфичен для хрупкого разрушения; поверхность разрушения имеет мелкозернистую структуру. Минеральный состав образца ППГ-30, мас. %: шпинель $MgAl_2O_4$ 67,8, хромшпинелид $(Mg, Fe)(Cr, Fe, Al)_2O_4$ 20,8, окерманит $Ca_2Mg_{0,5}Fe_{0,5}Si_2O_7$ 10,2, периклаз 1,4.

Образец ППГ-50 представлен мелкозернистой сцементированной породой красновато-серого цвета. Его минеральный состав, мас. %: шпинель 59,8, окерманит 19,6, волластонит $CaSiO_3$ 14,3, хромшпинелид 5,3, феррохром (Cr, Fe) 1,0. Шпинель по сравнению с другими минералами имеет крупные кристаллы октаэдрической формы (реже — додекаэдрической) размерами 200–400 мкм, которые сцементированы мелкозернистой смесью из других минералов. Шпинель содержит примеси хрома (розовые и рубиново-красные цвета) и кальция, сферические и каплевидные включения железа, которые располагаются по периферии кристаллов.

Образец ППГ-30Б был представлен бетоном, изготовленным из измельченного образца ППГ-30. Образец имел однородную мелкопористую структуру; размер зерен в среднем менее 100 мкм. Минеральный состав образца ППГ-30Б, мас. %: окерманит 36,6, периклаз 18,9, хлоритоид $\text{MgFeAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 18,2, кальцит 14,5, хромшпинелид 13,7. Встречаются единичные кристаллы розовой шпинели MgAl_2O_4 размерами 100–200 мкм, количество которой не превышает 1 мас. %. В хромшпинелиде отмечаются примеси титана; минерал представлен октаэдрическими кристаллами и их обломками.

ППГ поставляется в дробленном виде; фракции по согласованию с заказчиком. Лучшими заполнителями закладочной смеси в шахтных производствах являются материалы со средней крупностью частиц (от 0,30 до 1,0 мм) с добавкой гравия или щебня в количестве 30–40 % общей массы заполнителя. Производственная

площадка для хранения ППГ выполнена в виде открытого склада сыпучих материалов. Авторы предлагают в качестве подложки использовать водонепроницаемый экран в виде геомембраны, которая представляет собой гибкий материал, изготовленный из синтетических полимеров.

Таким образом, продукты ППГ-30 и ППГ-50, представляющие собой мелкозернистые пылеобразные массивные агрегаты, могут быть использованы в качестве вяжущих для получения жаростойких и огнеупорных бетонов. Эти продукты перспективны также в производстве огнеупоров, высокоглиноземистого и глиноземистого цемента, абразивной продукции, в качестве основного материала при выплавке синтетических шлаков для рафинирования стали, для изготовления шлакообразующих смесей и теплоизолирующих покрытий.

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ



E-mail: davidovtrans@mail.ru

СОСТОЯНИЕ ПЫЛЕОБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ИЗ ПЛАВЛЕННЫХ ГЛИНОЗЕМИСТЫХ ПРОДУКТОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

© Д. Т. Н. С. Я. Давыдов¹ (✉), Д. Х. Н. Р. А. Апакашев¹, Д. Г.-М. Н. В. А. Перепелицын², С. А. Федоров^{1,3}

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

² ООО НПО «ВостИО-Урал», пос. Шабровский Свердловской обл., Россия

³ ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН», Екатеринбург, Россия

Для хранения продукта плавленного глиноземистого (ППГ) производственная площадка НПО «ВостИО-Урал» выполнена в виде открытого склада для сыпучих материалов. При этом поверхность открытой производственной площадки покрыта слоем пылеобразных частиц полуфабриката.

Плавленные глиноземистые материалы в пылеобразном состоянии обладают выраженным фиброгенным действием. Присутствующие в них оксиды находятся в виде разных минеральных образований сложного состава. Пылеобразный плавленный глиноземный продукт (ППГ-30П) представлен мелко- и среднезернистым порошком темно-серого цвета, в котором преобладают зерна размерами 0,1–0,5 мм.

Проведенный ситовой анализ показал значительное количество в порошке мелкой и тонкой фракций (шлама, размер зерен в котором преимущественно менее 10 мкм), суммарное количество которых составляет 33,61 мас. %. Эти фракции достаточно легко разносятся ветром и увеличивают количество пылеобразных частиц в воздухе рабочей зоны и прилегающих к предприятию территорий.

Варианты использования любых техногенных образований и, в частности, отходов плавленного глиноземистого производства должны базироваться на анализе возможного влияния их на окружающую среду и, в том числе, на почву. Для этого в настоящей работе провели сравнение химического состава исследуемого материала с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) для почв.

В химическом составе исследуемого материала преобладают Al_2O_3 , MgO , CaO , SiO_2 суммарное количество оксидов составляет 84 мас. %. Отмечается повышенное содержание в пробе хрома (до 5,90 мас. %) и титана (до 3,00 мас. %). Минеральный состав пыли, мас. %: шпинель $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ + $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Ti})_2\text{O}_4$ 22–25, бонит $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 10–12, β -глинозем $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ 5–7, майенит $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 25–30, корунд $(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ + $(\text{Al}, \text{Ti})_2\text{O}_3$ 3–5, перовскит CaTiO_3 3–4, хром 2–3, ферротитан FeTi 2–3, феррохром FeCr 5–7, силикаты $(\text{Ca}_2\text{SiO}_4, \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ и др.) 13–17, прочие до 5 (графит, базальт, брусит). По вещественному составу пыль представляет собой механическую смесь измельченных ферросплавных шлаков, периклазоуглеродистых огнеупоров и базальта.

Проведенное изучение состава минералов показало, что весь хром находится в трехвалентном состоянии Cr^{3+} в шпинели, а также в виде металла Cr^0 и феррохрома. Первый минерал довольно устойчив к кислотам, щелочам и высоким температурам, в связи с этим в природных условиях выноса хрома происходить не будет. В отличие от химически инертных минералов группы шпинели хром и феррохром менее устойчив по сравнению со шпинелями, однако в природных условиях практически не окисляются и их количество в исследуемом материале крайне мало. Содержание других токсичных элементов в пылеобразном материале пробы ППГ-30П низкое и не превышает установленные нормы ПДК. Химический анализ также показал отсутствие шестивалентного хрома.

Таким образом, с точки зрения воздействия на окружающую среду (по вещественному составу) исследуемый материал является безопасным. Однако нельзя того же сказать про фракционный состав пылеобразного материала — высокий выход тонкой фракции указывает на то, что материал легко может разноситься ветром, засоряя почвенный покров вокруг отвалов.

Судя по характеристикам, исследуемый пылеобразный материал можно использовать в цементной промышленности в качестве корректирующей добавки. Преимущественно используют регламентированный ГОСТ 3476–74 гранулированный доменный шлак. Стандартами и предприятиями — производителями цемента установлены нормативы по химическому составу корректирующей добавки и критерии ее качества.

Высокое содержание оксидов хрома и титана (в сумме до 9,0 мас. %) дает основание предполагать о возможности использования пылеобразного материала в качестве модифицирующей добавки при производстве каменного литья, ситаллов, цветного стекла и других силикатных материалов. При этом функциональная роль дисперсных частиц хромита и рутила

(TiO_2) в пылеобразном материале заключается в образовании центров кристаллизации как в силикатных расплавах при охлаждении (хромит), так и при обжиге (рутил) стекол в твердом состоянии при производстве петругических (камнелитых) изделий и ситаллов соответственно. В петругии необходимо введение в шихту до 3,0 мас. % хромита.

Наибольшим фиброгенным действием обладают пылеобразные частицы, содержащие свободный SiO_2 . Для персонала весьма опасны пылеобразный кварц, кристобалит и тридимит, образующиеся при производстве стекла и диносовых изделий и содержащие более 90 % свободного SiO_2 . Следует отметить, что в изученной смеси доменного и ферросплавного шлака кварц и свободный кремнезем отсутствуют.

Проблема сбора пылеобразного материала на промплощадках является весьма актуальной с точки зрения производительности процессов обработки породы, а также для обеспечения санитарных норм, ограничивающих ПДК вредных газов и аэрозоля. Авторами предложена установка для сбора пылеобразного материала, который является дополнительным ценным сырьем для промышленных предприятий.

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

КЫШТЫМСКИЙ КАОЛИН В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИКИ

(✉)

E-mail: htoko@yandex.ru

© В. А. Турковский¹, Д. Т. Н. И. Д. Кашеев², А. А. Глебова², К. Т. Н. И. А. Павлова² (✉),
К. Т. Н. Е. П. Фарафонтон²

¹ ООО «Кыштымский каолин», г. Кыштым Челябинской обл., Россия

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

В настоящее время керамические предприятия испытывают дефицит качественных каолинов. Для производства фарфоровых изделий уральские каолины используют в ограниченном количестве. Основную часть каолинов в литейные шликеры вводят в виде украинских высококачественных сортов, которые и обеспечивают литейные свойства шликера. Связано это с высокими значениями показателей упругости и порога структурообразования уральских каолинов. Эти показатели влияют на реологические и литейные свойства керамических масс. Шликер на основе уральских каолинов имеет не постоянную текучесть.

Обнаружено, что шликеры на основе некоторых сортов каолинов Кыштымского месторождения легко разжижаются и обладают требуемой текучестью. В связи с этим были исследованы свойства каолинов двух сортов: «текучий» и «нестекучий» (плохо разжижаемый даже под действием электролитов) для определения причины такого различия. Кроме того, для сравнения были исследованы свойства глуховецкого каолина (Украина) как эталона каолина по литейным свойствам. Время истечения текучей и глуховецкой проб при одинаковой влажности совпадали.

Были определены минеральный, химический, гранулометрический составы проб каолина метода-

ми рентгенофазового анализа, дифференциально-сканирующей калориметрии, сканирующей электронной микроскопии. Исследования проводили на обогащенных пробах каолина. Пробы каолина предварительно распускали в дистиллированной воде и промывали через сито № 0063. Полученную суспензию высушивали. Для получения микрофотографий использовали кусочки природного каолина.

Значительного различия по химическому составу не было обнаружено: все три пробы каолинов относятся к основным с низким содержанием красящих оксидов. Содержание частиц размерами менее 2 мкм в текучей пробе каолина составило 18 %, в нестекущей — 30 %, в глуховецком каолине — 48 %. Основное различие проб кыштымских каолинов наблюдается в их минеральном составе. В текучей и глуховецкой пробах каолина монтмориллонит не был обнаружен, в нестекущей пробе его количество до 7 %. Основной фазой всех трех проб является каолинит (до 95 %); наблюдаются также кварц (до 5 %) и мусковит (до 5 %). По результатам электронной микроскопии было установлено присутствие в нестекущей пробе большего количества галлуазита, чем в текучей пробе. Емкость катионного обмена (ЕКО) проб каолина, определенная с использованием красителя метиленового голубого: текучей

пробы 8,67, нетекучей 9,96, глуховецкой 6,13 мг-экв. На 100 г сухого каолина.

Таким образом, было установлено, что пробы каолинов отличаются друг от друга дисперсностью, текущая проба в отличие от нетекучей более тонкодисперсна. Главным различием в минеральном составе проб каолина оказалось присутствие монтмориллонита в

нетекучей пробе. Известно, что монтмориллонитовые глины хуже разжижаются под действием традиционных электролитов, чем остальные. Основной задачей добычи каолинов является разделение их по сортам по минеральному составу. Это и будет определять применимость кыштымских каолинов в фарфоро-фаянсовом производстве.

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

МОДИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КЛАССИФИКАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ



E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. Т. Н. В. Н. Макаров, К. Т. Н. А. В. Угольников, Д. Т. Н. С. Я. Давыдов (✉), А. М. Филатов
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Использование наноматериалов для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы в производстве огнеупоров и тугоплавких композиционных материалов. Мелкодисперсный оксид алюминия является необходимым компонентом специальных высококачественных цементов, термостойких инертных огнеупоров и абразивных материалов.

Многочисленные исследования показывают, что эффективность утилизации ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианному диаметру и дисперсности частиц наноматериалов. В большинстве случаев требуемый размер наночастиц находится в диапазоне $d_c = 0,1 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}$ м, а их дисперсия $3\sigma = 0,2d_m$. Сдерживающими факторами повышения эффективности утилизации являются высокая энергоёмкость и недостаточное совершенство техники и технологии классификации мелкодисперсных отходов металлургического производства.

Для практического решения задачи утилизации наночастиц используется гидровихревой классификатор Вентури, обеспечивающий их разделение по фракциям с заданными медианным диаметром и дисперсией. При этом для повышения эффективности классификации в классификаторе Вентури использован вращающийся с угловой частотой аэратор. Результаты экспериментов и расчетов показывают широкие возможности управления геометрическими параметрами и расположением входного коллектора приемного бункера с помощью угловой частоты вращения капель жидкости для получения требуемой эффективности классификации микрочастиц материала по фракциям. Однако используемые в производстве форсунки не обеспечивают требуемую дисперсность капель жидкости и угловую скорость их вращения для классификации частиц с минимальным медианным диаметром $2 \cdot 10^{-6}$ м.

Авторами предложены критериальное уравнение для расчета параметров энергоэффективности

гидровихревой форсунки и ее конструкция (пат. 2737161, Российская Федерация. Способ гидровихревого кинематического пылеподавления и устройство для его реализации / Макаров В. Н., Макаров Н. В., Угольников А. В. [и др.]. — № 2020112760 ; заявл. 31.03.2020 ; опубл. 25.11.2020, Бюл. № 33). Закрутка и дробление капель жидкости происходит в плоскости тангенциального разрыва противоположно направленных вращающихся по концентрическим окружностям слоев жидкости.

На базе уравнения Бернулли получено выражение для скорости V , м/с, истечения жидкости из предложенной гидровихревой форсунки:

$$V = \sqrt{(V_{ж} - V_{г})^2 + 0,25d_c^2 \cdot \omega_{ж}^2} = k_{\phi} \sqrt{\frac{2\delta P}{\rho_{ж}}},$$

где $V_{ж}$ — начальная расходная скорость движения капли жидкости, м/с; $V_{г}$ — скорость газа, м/с; d_c — диаметр канала гидровихревой форсунки, м; $\omega_{ж}$ — угловая частота вращения капли жидкости, c^{-1} ; k_{ϕ} — коэффициент формы канала гидровихревой форсунки, определяющий уменьшение расходной скорости жидкости и, соответственно, объемного расхода форсунки, $k_{\phi} = 0,73 \div 0,97$; δP — разность давлений на входе и выходе гидровихревой форсунки, Па; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, kg/m^3 .

С использованием теоремы подобия получена обобщенная функциональная зависимость исследуемого гидровихревого инерционного диспергирования капель жидкости в процессе улавливания наночастиц в виде уравнений, связывающих между собой безразмерные независимые параметры, характеризующие процесс гидровихревого диспергирования и поглощения.

Критический уровень устойчивости вращающихся капель жидкости к дроблению под действием скоростного аэродинамического напора и центробежных сил при набегании на поток газа в соответствии с уравнением Лапласа определен по формуле

$$(V_{ж} - V_r)^2 + 0,25d_c^2\omega_{ж}^2 = 8\frac{\sigma_{ж}}{d_{ж}^k}\gamma\rho_r,$$

где $\sigma_{ж}$ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Дж/м²; $d_{ж}^k$ — критический диаметр устойчивости к диспергированию вращающейся капли жидкости, м; γ — коэффициент аэродинамического сопротивления газа; ρ_r — плотность газа, кг/м³.

Приведенный диаметр диспергированной капли жидкости при заданном диаметре канала гидровихревой форсунки получен в виде

$$\bar{d}_{ж} = \frac{6,4}{\gamma We},$$

где We — эффективный критерий Вебера для сопла форсунки.

Установлены основные критерии, определяющие подобие физического процесса гидровихревого ортокINETического гетерокоагуляционного диспергирования и коагуляции в гидровихревых форсунках: эффективный критерий Вебера и эффективный критерий Рейнольдса, рассчитанные по начальной расходной скорости движения жидкости из форсунки.

Применение гидровихревых форсунок предложенной конструкции в аэраторе классификатора Вентури позволяет повысить качество разделения наночастиц оксидов металлов по фракциям, обеспечив их медианный диаметр $2 \cdot 10^{-7}$ м с дисперсией не более 15 %, и поднять тем самым на более высокий уровень производство огнеупоров и тугоплавких композиционных материалов.

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

(✉)
E-mail: mirmey@ya.ru

СВС УПРОЧНЯЮЩИХ НИТРИДКРЕМНИЕВЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ЛЕТОЧНЫХ МАСС ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ЦИКЛОННОЙ ПЫЛИ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

© К. Т. Н. И. Р. Манашев¹ (✉), И. А. Ложкин², Э. М. Манашева³, к. т. н. И. В. Макарова³

¹ ООО Научно-техническая производственная фирма «Эталон», г. Магнитогорск, Россия

² ООО «Рнд МГТУ», г. Магнитогорск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Ферросплавы играют незаменимую роль в современном сталеплавильном производстве, но в то же время их выпуск сопровождается образованием большого количества техногенных отходов — пыли, шламов, шлаков и прочих материалов, требующих утилизации. Так, при производстве ферросилиция суммарное количество образующихся отходов втрое превышает количество товарного сплава. Часть отходов (отсевы кварцита, кокса и угля, а также шлаки) утилизируется, являясь товарной продукцией для строительства и металлургии. Сухая пыль газоочисток (микрокремнезема) используется для производства бетонов повышенной прочности. В то же время нерешенной проблемой остается эффективная переработка циклонной пыли ферросилиция, улавливаемой рукавными фильтрами в процессе измельчения его слитков. Такая пыль, известная как продукт улавливания от дробления и фракционирования (ПУД), образуется при выделении разных избыточных фаз из-за присутствия в сплаве примесей, а также фазового перехода при 918 °C: $FeSi_{2,3} \rightarrow FeSi_2 + Si$. Такое эвтектическое превращение лебита в дисилицид кремния сопровождается увеличением объема и разрушением сплава. В результате этого аспирационной системой может улавливаться до 3–5 % ПУД ферросилиция общего объема его производства. Традиционные способы ее утилизации путем окускования и последующего передела или непосредственного применения брикетов в плавке стали неэффективны, поскольку при этом большая часть продукта, как показывает практика, сгорает или теряется со шлаком.

Перспективным способом переработки мелкодисперсных некондиционных ферросплавов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который был предложен как энергоэффективный способ получения тугоплавких неорганических соединений — карбидов, силицидов, нитридов и пр. При этом СВС-продукты имеют уникальную структуру, которая образуется в результате прохождения в объеме шихты высокотемпературного фронта горения (температура реакции здесь может достигать 2500 °C и выше) и последующего структурообразования продукта в условиях высокого градиента температур и высокой скорости. Использование СВС для переработки дисперсных некондиционных ферросплавов открывает возможности для получения новых композиционных легирующих и огнеупорных материалов с уникальными свойствами.

В НТПФ «Эталон» (г. Магнитогорск) исследована возможность переработки циклонной пыли ферросилиция путем азотирования в режиме фильтрационного горения при повышенном давлении. Анализ исходных материалов показал, что ПУД ферросилиция высокопроцентных марок ФС65 и ФС75 состоит из дисилицида железа и кремния, а ПУД 45 %-ного сплава — из $FeSi_2$ и $FeSi$. При взаимодействии таких сплавов с азотом в режиме горения при повышенном давлении образуется высокоазотистый композиционный материал, основу которого составляет β -нитрид кремния, а его своеобразной связкой — железом и его силицидами. Показана возможность управ-

ления составом синтезированных материалов путем регулирования давления азота и дисперсности шихты. Обнаружена двухстадийность поглощения азота во время послыйного горения циклонной пыли: после прохождения фронта горения протекает процесс объемного дореагирования, в результате которого доля поглощенного азота может возрастать примерно на 30 %. С этим явлением связано отсутствие зависимости концентрации азота в синтезированных продуктах горения от давления.

В соответствии с проведенными лабораторными исследованиями предложена новая технология утилизации ПУД ферросилиция в композиционные СВС-материалы на основе нитрида кремния. Химический состав нитрида кремния и композиционных материалов на его основе производства НТПФ «Эталон» по ТУ 20.13.64-059-21600649–2021 приведен в таблице.

Материал	Массовая доля, %					
	N	Si	Al	Fe	C	O
Нитрид кремния марки НК 1	36,0	60,5	0,5	0,5	0,11	0,6
Композиционный Nitro-Fesil TL	30,0	52,5	0,7	13,5	0,4	1,0
Легирующий Nitro-Fesil A	28,5	54,0	0,5	14,4	0,2	0,7
Композиционный Refrasin	27,0	50,0	1,0	12,0	5,5	1,1

Леточные и набивные желобные массы с упрочняющими добавками Nitro-Fesil и Refrasin, испытанные в доменном цехе ММК, показали лучшие характеристики спекаемости, прочности и коррозионной стойкости в сравнении с традиционными «безнитридными» массами отечественного и импортного производства. При применении в доменных печах ММК вместимостью 3000 м³ леточной массы с упрочняющей добавкой Refrasin получены следующие результаты: удельный расход леточной массы 0,32 кг/т, продолжительность выпуска 1 ч 11 мин, количество буров для вскрытия летки примерно 1,7. Нештатные ситуации из-за сильных разгаров леточных каналов или укорачивания длины леток не наблюдались. По результатам опытно-промышленных испытаний, леточная масса с упрочняющей добавкой Refrasin (производства АО «Динур») была рекомендована к серийному применению на всех доменных печах.

ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОФОРМАТНЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ПЕРИКЛАЗОВЫХ ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ СВОДА ЭЛЕКТРОПЕЧИ

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

(✉)
E-mail: opitsik@magnezit.com

© О. Н. Пицик (✉), Е. А. Киселева, Д. А. Найман
ООО «Группа Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

На Саткинской производственной площадке Группы Магнезит разработан термостойкий периклазовый огнеупор марки ПЦП-90 для футеровки свода ферросплавных печей Актюбинского завода ферросплавов (АЗФ). При работе этих печей огнеупоры испытывают значительные термические напряжения и химическое воздействие агрессивных компонентов. Для обеспечения требуемой стойкости футеровки свода применяют импортные крупногабаритные корундомуллитовые огнеупоры длиной до 550 мм, которые после эксплуатации имеют небольшую остаточную толщину.

Опытные термостойкие периклазовые огнеупоры размерами 400×250×90 мм имели следующие показатели: предел прочности при сжатии около 60 Н/мм², открытая пористость около 16 %, термостойкость (1300 °С – вода) более 25 теплосмен, температура начала размягчения (по ГОСТ 4070–2020) выше 1700 °С. Огнеупоры были установлены совместно с корундомуллитовыми в разных зонах футеровки свода ферросплавной печи постоянного тока: в зоне газозахода со стороны 1-й шлаковой летки, в зоне 3-го взрывного клапана со стороны 2-й шлаковой летки,

между 1- и 2-м взрывными клапанами напротив 1-й металлической летки. Осмотр состояния футеровки свода после эксплуатации печи показал, что опытные огнеупоры отслужили в зоне футеровки свода между 1- и 2-м взрывными клапанами 7 мес без износа с сохранением первоначальных размеров (см. таблицу).

Сравнительный анализ состояния изделий показал следующее:

- опытные периклазовые изделия сохранили начальные размеры с образованием устойчивого гарнисажного покрытия на рабочей поверхности;
- серийно применяемые корундомуллитовые огнеупоры подверглись износу (115–200 мм) с образованием трещин.

По данным петрографического анализа образцов изделий после службы в футеровке свода ферросплав-

Огнеупор	Толщина футеровки, мм		Износ, мм
	начальная	остаточная	
Опытный	400	400	0
Импортный	425	310	115
»	550	350	200

ной печи АЗФ, коррозия опытного огнеупора отсутствует; зафиксировано уплотнение его микроструктуры за счет высокотемпературной перекристаллизации с образованием новых фаз при взаимодействии с компонентами шлака (шпинель и форстерит), заполняющими поровое пространство изделия. Механизм интенсивного износа корундомуллитовых огнеупоров заключается в коррозии огнеупорных компонентов с образованием легкоплавких щелочных алюмосиликатов под действием высокой температуры.

Результаты промышленных испытаний подтвердили техническую возможность применения в футеровке свода ферросплавной печи АЗФ огнеупоров разработанного состава в качестве альтернативы применяемым огнеупорам зарубежных производителей. В настоящее время на Саткинской производственной площадке продолжается промышленное освоение технологии производства крупноформатных периклазовых термостойких изделий с применением современного технологического оборудования.

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

ОЦЕНКА СИСТЕМЫ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ ПРИ ПЛАВКЕ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ОГНЕУПОРОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

(✉)
E-mail: sokolov235@yandex.ru

© Д. Т. Н. В. А. Соколов (✉), к. т. н. С. С. Киров

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Огнеупоры с высоким содержанием оксида хрома (плавнелитые хромшпинелидные и керамические хромоксидные) благодаря исключительно высокой коррозионной стойкости к агрессивным минеральным расплавам не имеют альтернативы среди всех типов огнеупорных материалов. Наиболее эффективно они используются для футеровки печей, производящих стекловолно, минеральную вату, а также установок для утилизации радиоактивных отходов. Следует отметить, что отсутствие в России специализированного производства хромсодержащих огнеупоров и полная зависимость отечественных предприятий от зарубежных поставщиков небезопасны в условиях экономических кризисов.

С учетом возможности организации производства плавнелитых хромсодержащих огнеупоров на базе отечественных научно-технологических разработок важным является обеспечение экологической безопасности. Это связано с использованием в составе сырья технического оксида хрома и возможной вероятностью присутствия и образования в технологическом процессе шестивалентного хрома. В этой связи создание эффективной системы пылегазоочистки при плавке хромсодержащих огнеупоров в электродуговой печи является важной задачей.

Оценка планируемой системы пылегазоочистки при плавке хромсодержащих огнеупоров в электродуговой печи ДСП-1,5 проведена с учетом практики получения таких материалов на Щербинском заводе электроплавящих огнеупоров и комбинате «Магнезит». При плавке шихты хромсодержащих огнеупоров наблюдается образование некоторого количества соединений шестивалентного хрома (хромового ангидрида) — соединения первой категории токсично-

сти; его ПДК в воздухе рабочей зоны составляет 0,01 мг/м³. Схема газоочистки должна обеспечивать снижение содержания в отходящих газах электропечи соединений шестивалентного хрома до уровня ПДК в атмосфере 0,0015 мг/м³. Кроме того, схема газоочистки должна быть безотходной, т. е. уловленные из газа пыль шихты и возгоны хрома должны быть возвращены в схему производства.

В основу исходных данных для проектирования системы газоочистки заложены: параметры газовой фазы электропечи ДСП-0,5 комбината «Магнезит» с корректировкой на производительность печи ДСП-1,5; результаты работ УНИХИМа по газоочистке заводов хромовых соединений (производство хромового ангидрида и оксида хрома) и промывных отделений сернокислотных цехов; данные лабораторных исследований по возгонке хромового ангидрида и оксида хрома.

Приведена схема газоочистки, включающая последовательно установленные циклон, два скруббера и два мокрых электрофилтра. Схема является безотходной. Это достигается тем, что конденсат электрофилтров и щлам скрубберов смешивают с сухой пылью из циклона, смесь брикетируют на валковом прессе, а брикеты возвращают в электропечь. Лабораторные опыты на гидравлическом прессе и модельные опыты на валковом прессе показали возможность получения высокопрочных брикетов из пыли хромшпинелида.

Проведены экологическая оценка производства и обстановки рабочей зоны, в том числе определение фона по шестивалентному хрому и диоксиду серы. Найдено, что хром в фоне отсутствует, а система газоочистки обеспечивает выполнение норм ПДК без рассеивания выхлопной трубой.

ТЕПЛОТЕХНИКА

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО РЕГЕНЕРАТОРА
СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ**

(✉)

E-mail: vdzuzer@yandex.ru

© Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉), Ю. В. Гизатуллина

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Эффективность регенерации энергии дымовых газов для подогрева воздуха на горение определяется конструктивными и режимными параметрами теплообменного устройства. В стекловаренных печах в основном используют вертикальные регенеративные теплообменники, КПД которых составляет 60–68 %. При определенных условиях энергоэффективность регенераторов может превышать 70 %. Количество рекуперированной энергии зависит от объема насадки в регенераторе. Как правило, объем насадки лимитируется ее высотой, что обусловлено размерами регенератора и условиями привязки печи в производственном здании. В этой связи представляется актуальным применение многооборотных схем теплообмена.

Цель данной работы — разработка технических решений по модернизации регенератора стекловаренной печи № 1 ТОО «Qazaq Glass Company» (г. Алматы). Печь производительностью 160 т/сут предназначена для варки бесцветного тарного стекла. Модернизация регенератора обусловлена необходимостью уменьшения удельного расхода теплоты на варку от 1250 до 1150 ккал/кг и снижения температуры дыма перед трубой до 370 °С. Существующий двухоборотный регенератор имеет КПД, равный 65,7 %. При температуре подогрева до 1260 °С доля физической теплоты воздуха в тепловом балансе печи составляет 36,6 %. Температура дымовых газов на входе и выходе из регенератора равна 1450 и 411 °С соответственно.

Расчеты показывают, что габаритные размеры двухоборотного регенератора печи № 1 достаточны для реализации трехоборотной схемы регенерации теплоты дыма. В конструкции трехоборотного регенератора

в наибольшей мере могут быть учтены особенности коррозионного износа огнеупоров. По условиям службы огнеупоров насадку по высоте регенератора (сверху–вниз) условно разделяют на три зоны: высокотемпературную, конденсации сульфатов и низкотемпературную. Выделенные зоны насадки соответствуют горячей, средней и холодной камерам трехоборотного регенератора. Установлено, что ограничения по высоте насадки (5–6 м) выполняются при условии, что температура дыма в средней камере изменяется в пределах 1000–700 °С. Совместное решение уравнений теплопередачи и теплового баланса для каждой камеры регенератора позволило определить, что трехоборотная схема регенерации обеспечивает подогрев воздуха на горение до 1310 °С. При этом температура дыма перед трубой снижается до 362 °С. КПД трехоборотного регенератора составляет 69,0 %, а доля физической теплоты воздуха в тепловом балансе печи равна 40,0 %.

Насадка нового регенератора выполнена дымовыми блоками горшечного типа высотой 150 мм с толщиной стенки 30 мм. В горячей и холодной камерах установлены блоки типа TL 15/15 с горизонтальными проходами в боковых стенках. Блоки изготовлены из периклаза (97 % MgO) кажущейся плотностью 2960 кг/м³. В средней камере использованы блоки TG 15/15 (без горизонтальных проходов), изготовленные из магнезиальноциркониевого огнеупора (97 % MgO, 14 % ZrO₂) кажущейся плотностью 3100 кг/м³.

Суммарный объем насадки в трех камерах равен 251,9 м³, ее масса 204,4 т. Рациональное использование насадки разной плотности позволило снизить ее массу в регенераторе на 66,8 т.

ТЕПЛОТЕХНИКА

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОГО СВОДА
СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ**

(✉)

E-mail: vdzuzer@yandex.ru

© Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉), Д. В. Паньков

ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Свод стекловаренной печи является объектом индивидуального проектирования. Его выполняют в виде лучковой арки с центральным углом 60° и одним замком на оси свода. Для кладки свода используют высококачественный стекольный диас, характеризующийся сбалансированным химическим составом, в котором массовая доля SiO₂ не менее 96 %, а Fe₂O₃ не превышает 0,4 %. При выборе конкретных марок диаса учитывают температуру длительного применения (1580–1600 °С) и максимальный локальный нагрев

до 1620 °С. Допуски на линейные размеры изделий не должны превышать ± 1 мм. Гранулометрический состав диасового мертеля определяют диапазоном 0–0,3 мм, что обеспечивает толщину шва 1–2 мм. Содержание оксида кремния в мертеле не менее 95,5 %, а оксида железа не более 0,1 %.

Толщина свода (375–500 мм) определяется шириной пролета (6–11 м). Кладку свода выполняют клиновыми изделиями без применения прямых кирпичей. При этом сбавок (разнотолщинность) двухстороннего

клина может иметь как четное, так и нечетное значение. Расчет свода и типоразмеров клиновых изделий выполняют методом последовательных приближений с конструктивно приемлемой корректировкой ширины пролета. Приведем несколько примеров из проектной практики В. Дзюзера.

В стекловаренной печи производительностью 120 т/сут ширина пролета равна 6,65 м. Свод толщиной 400 мм выполнен клиновыми кирпичами, сбавок которых равен 6 и 7 мм. В своде печи (330 т/сут) с шириной пролета 8,89 м и толщиной 450 мм использованы клиновые изделия, имеющие сбавок 5 и 7 мм. Аналогичными клиновыми изделиями выполнен свод печи (420 т/сут) толщиной 450 мм с шириной пролета 10,36 м.

Эксплуатационная надежность динасового свода зависит от его газоплотности, которая обеспечивается применением только клиновых изделий и теплоизоляцией кладки, выполняемой после герметизации ее наружной поверхности водным раствором мертеля. Толщина герметизирующего слоя 10 мм. Целесообразность теплоизоляции продиктована не только снижением потерь теплоты в окружающую среду, но и особенностями термического расширения стекольного динаса, завершаемого при 1350 °С.

Результаты расчета теплопередачи свидетельствуют о том, предусмотренная проектом структура теплоизоляции свода в 4,4 раза уменьшает потери теплоты в окружающую среду по сравнению с неизолированной огнеупорной кладкой. При этом она сохраняет свою пригодность к эксплуатации при предельной (локальной) температуре нагрева внутренней поверхности свода и создает тем самым объективные предпосылки для безопасной работы печи на форсированных режимах работы.

Расчет потерь теплоты через свод производят по одномерному уравнению теплопередачи для цилиндрической стенки при смешанной постановке граничных условий I и III рода. Граничные условия I рода задают средней температурой поверхности свода, определяемой математическим моделированием внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи. Например, в стекловаренной печи про-

изводительностью 330 т/сут с удельным съемом стекломассы 2,83 т/(м²·сут) средняя температура свода равна 1512,6 °С. Для неизолированного свода толщиной 450 мм и радиусом нижней дуги 8,89 м наружная температура кирпича равна 219,5 °С. Плотность теплового потока в окружающую среду, рассчитанная по погонной плотности, составляет 4380,5 Вт/м². Средняя температура нагрева свода (866,0 °С) свидетельствует о незавершенности термического расширения огнеупора.

В зарубежной практике теплоизоляцию свода выполняют динасовым кирпичом кажущейся плотностью 590–1100 кг/м³ с квалификационной температурой 1500–1600 °С. В качестве примера приведем наиболее эффективный вариант теплоизоляции, выполненный двумя слоями кирпича по 65 мм (1100 кг/м³) и тремя слоями кирпича по 65 мм (590 кг/м³). Температура наружной поверхности огнеупора и теплоизоляции 1227,6 и 97,5 °С соответственно. Плотность теплового потока в окружающую среду 1111,6 Вт/м². Следует отметить, что средняя температура нагрева огнеупора 1370,1 °С свидетельствует о завершении термического расширения динаса и создании условий для его длительной эксплуатации.

В проектах В. Дзюзера теплоизоляция свода выполнена штучными и рулонными теплоизоляционными изделиями. Например: 1-й слой — кирпич (114 мм) кажущейся плотностью 1100 кг/м³; 2-й слой — рулонные маты Cerachem™ Blanket толщиной 50 мм (128 кг/м³) и 3-й слой — рулонный войлок МКРВ-200 (4 слоя по 20 мм; 200 кг/м³). В этом варианте температура наружной поверхности огнеупора и теплоизоляции 1237,9 и 96,3 °С соответственно. Плотность теплового потока в окружающую среду 1084,7 Вт/м².

Применение муллитокремнеземистых волокнистых изделий существенно упрощает установку теплоизоляции и облегчает ее демонтаж в случае проведения локальных ремонтов огнеупорной кладки. Многослойное покрытие рулонным волокном обеспечивает перекрытие стыков отдельных рулонов. Для защиты внешней поверхности теплоизоляции свода от шихтовой пыли ее покрывают стеклотканью.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ФОСФАТНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ И ЖАРОСТОЙКИЙ ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ ШАМОТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

(✉)
E-mail: uralniist@mail.ru

© К. Т. Н. В. А. Абызов (✉), Н. Е. Посаднова
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Россия

Одна из актуальных задач материаловедения — разработка энергоэффективных (не требующих обжига) жаростойких теплоизоляционных материалов. Для работы при высоких температурах (1400 °С и выше) на российском рынке представлены, главным образом, штучные обжиговые изделия (шамотные и корундовые легковесные, шамотно-волокнистые плиты,

высокоглиноземистые материалы на основе огнеупорного волокна). Технология обжиговых материалов не предусматривает широкой номенклатуры изделий по типоразмерам. В то же время ячеистые бетоны не только не требуют обжига, но и позволяют изготавливать изделия сложной формы, а также крупноразмерные (до 600–800 мм). Ячеистые бетоны практиче-

ски не требуют калибровки и шлифования. Рабочая температура наиболее огнеупорной разновидности газобетона (на фосфатных связующих) составляет 1400–1600 °С в зависимости от вида заполнителя и плотности материала.

Для производства алюмофосфатного связующего и его разновидностей, используемых в технологии фосфатного газобетона, требуется дорогостоящий гидроксид алюминия. Снизить стоимость можно путем перехода на алюмосиликофосфатное связующее, получаемое на основе алюмосиликатных материалов. Для снижения стоимости связующего, а также утилизации промышленных отходов фосфатную связку получали нейтрализацией ортофосфорной кислоты дисперсными алюмосиликатными отходами шамотного производства. В работе была использована 0,25- и 0,5-замещенная фосфатная связка.

В результате проведенных исследований было установлено, что полученное алюмосиликофосфатное связующее по своим свойствам (плотность, вязкость, огнеупорность) незначительно отличается от алюмоборфосфатного и пригодно для получения фосфатного газобетона. Средняя плотность связки составила 1,48 г/см³ при степени замещения 0,25. В качестве огнеупорных наполнителей использовали шамотный порошок ЗШБ производства АО «Сухоложский огнеупорный завод», зерновой состав которого удовлетворял требованиям к классу 5, а также регенерированный нормальный электрокорунд фракции мельче 0,2 мм. Для частичной замены наполнителей вводили добавку алюмосиликатных

дисперсных отходов — пыль с электрофильтров производства шамота, содержащую не менее 32 % Al₂O₃. Удельная поверхность отходов не менее 3000 см²/г; неполный обжиг обеспечивал активность поверхности наполнителя к затворителю. В качестве газообразователя была использована алюминиевая пудра ПАП-2.

С применением шамотного заполнителя был получен газобетон со средней плотностью 550–800 кг/м³. Температура его применения 1400–1500 °С в зависимости от плотности. Использование в качестве добавки алюмосиликатных дисперсных отходов обеспечивает увеличение прочности шамотного газобетона до 2,5 МПа при средней плотности 600 кг/м³. С использованием корундового заполнителя был получен газобетон со средней плотностью 650–900 кг/м³ и максимальной температурой применения 1500–1600 °С. Термостойкость газобетона 10–15 теплосмен воздух–800 °С (по ГОСТ 20910–2019).

Установлено, что введение добавки в виде отходов обеспечивает повышение прочности газобетона на 10–20 % относительно контрольных составов. Таким образом, разработанный газобетон на алюмосиликофосфатном связующем, дисперсных шамотных и корундовых заполнителях не уступает по прочности и температуре применения ранее разработанному газобетону на алюмофосфатной связке.

В настоящее время в ЮУрГУ проводятся работы, направленные на повышение термостойкости фосфатного ячеистого бетона; проходит апробация материала в промышленных условиях.

ЖАРОСТОЙКИЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ДОБАВКОЙ ШЛАКА АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМИСТОМ ВЯЖУЩЕМ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: uralniist@mail.ru

© К. Т. Н. В. А. Абызов (✉), С. Н. Черногорлов

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Россия

Одним из наиболее перспективных видов теплоизоляции в интервале 1200–1300 °С являются легкие жаростойкие бетоны. Однако большинство легких заполнителей имеют ограниченную температуру применения. В связи с этим целесообразно расширить номенклатуру ячеистого бетона.

Для изготовления ячеистого бетона в качестве вяжущего был использован глиноземистый цемент ГЦ марки Sesar 38R (производства Kerneos), отличающийся интенсивным набором прочности. Для повышения огнеупорности вяжущего и бетона на его основе, а также снижения его себестоимости цемент был модифицирован добавкой высокоглиноземистого шлака алюминотермического производства ферротитана (марки ППГ-65, ПАО «Ключевской завод ферросплавов»). Состав шлака представлен огнеупорными соединениями — преимущественно шпинелью, СА₆ и перовскитом. Присутствие небольшого количества СА₂ обеспечивает шлаку комплексное действие — как

огнеупорный наполнитель и как компонент вяжущего. Модифицированный цемент получали помолом шлака ферротитана и последующим смешиванием его с исходным ГЦ. Модифицированное вяжущее имеет удельную поверхность 4000–4200 см²/г. Нормальная плотность цемента не увеличилась, так как шлак имеет пониженную по сравнению с ГЦ смачиваемость водой. Начало схватывания — не ранее 45 мин, прочность при сжатии в 3-сут возрасте не менее 50 МПа. Отмечено, что введение добавки шлака снижает усадочные деформации цементного камня. Так как в глиноземистом цементе при гидратации почти не выделяется щелочь, для регулирования процессов вспучивания газобетонной смеси вводили добавки солей щелочных металлов, повышающие pH среды, а также поверхностно-активные вещества.

В качестве заполнителя был использован шамотный порошок марки ЗШБ производства АО «Сухоложский огнеупорный завод», зерновой состав порошка

удовлетворял требованиям к классу 5. Для обеспечения процесса вспучивания в смесь вводили добавку алюминиевой пудры ПАП-2 по ГОСТ 5494–95.

В результате проведенных исследований был разработан быстротвердеющий (твердение в нормальных условиях при $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$) ячеистый жаростойкий материал (газобетон) со средней плотностью после сушки 650–800 кг/м³. Предел прочности при сжатии бетона после 3-сут твердения 1,5–3,2 МПа. Дополнительное введение в смесь добавок-модификаторов позволяет после 12–18 ч твердения в нормальных условиях обеспечить предел прочности при сжатии

газобетона не менее 75 % прочности через 3 сут твердения. Максимальная температура применения бетона не ниже 1300 °C, термостойкость воздух – 800 °C (по ГОСТ 20910–2019) 5–10 теплосмен в зависимости от плотности материала.

В настоящее время проводятся работы по повышению качества легкого бетона и расширению номенклатуры заполнителей. В НПП «Уралбоксит» (г. Челябинск) была произведена опытная партия изделий из газобетона со средней плотностью 650 кг/м³. Изделия изготовлены в виде блоков размерами 600×300×(100÷200) мм.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: mora1997@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШИБЕРНЫХ ЗАТВОРОВ

© М. С. Антипов (✉), А. Д. Бажина, К. Т. Н. А. С. Константинов, Д. Т. Н. П. М. Бажин

ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мерджанова Российской академии наук» (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия

В современной технологии непрерывной разливки расплавленного металла используются шибберные затворы, которые играют роль заслонок из плит огнеупорного материала. Такие плиты во время эксплуатации испытывают повышенные физико-механические и термические нагрузки. Ключевая проблема в эксплуатации шибберных затворов заключается в незначительном сроке службы огнеупорных плит. Выход огнеупорной плиты из строя влечет за собой потери разливаемого металла и остановку технологической линии для замены плиты, что в разы удорожает производство.

Разработан новый металлокерамический материал на основе карбида титана с химически активной матрицей из нихрома (ПХ20Н80), синтезированного в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующего высокотемпературного деформирования в условиях СВС-экструзии [1,2]. В качестве исходных реагентов использовали коммерческие порошки Ti (60 мкм, 99,1 %), C (1 мкм, 99,1 %) и NiCr (70 мкм, 99,9 %) при расчете, что после синтеза образуется 70 мас. % TiC и 30 мас. % связки NiCr. В результате проведенных работ были получены образцы диаметром 1–3 мм и длиной до 350 мм.

По данным рентгенофазового анализа, при СВС-экструзии формируется материал, который по сравнению с расчетным состоит из четырех фаз: TiC, Cr_{1,12}Ni_{2,88}, Cr₃C₂ и Ni. Установлено, что основной фазой являются

зерна TiC округлой формы, расположенные в матрице из NiCr (Cr_{1,12}Ni_{2,88}) и Ni. В объеме материала встречаются области с упрочняющими фазами карбида хрома (Cr₃C₂). Полученные металлокерамические материалы имеют твердость до 67,5 HRC и находятся на уровне вольфрамовых и безвольфрамовых твердых сплавов; микротвердость до 13,5 ГПа. Следует отметить, что предел прочности при изгибе полученного материала зависит от его пористости составляет 1080–1800 Н/мм². Регулировкой технологических параметров СВС-экструзии можно получать материалы с заданными структурой и набором свойств.

Полученные металлокерамические изделия предполагается использовать в дальнейшем как электроды для нанесения защитных покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ) на поверхность плит для шибберных затворов. Ранее было установлено, что улучшенные физико-механические свойства электродных материалов позволяют увеличить износостойкость обрабатываемой детали при повышенных термических и физико-механических нагрузках в 4–6 раз. В перспективе планируется получить из этих материалов сами шибберные затворы.

* * *

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук № МД-2909.2021.4.

**СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ SiO_2
С ДОБАВКОЙ ПЫЛЕОБРАЗНЫХ ОТХОДОВ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

(✉)

E-mail: mariavartanyan@mail.ru

© К. т. н. **М. А. Вартамян** (✉), К. т. н. **А. В. Макаров**, **Н. А. Попова**ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»,
Москва, Россия

По мере ужесточения требований природоохранного законодательства в Российской Федерации для металлургических и машиностроительных предприятий все большую актуальность приобретает проблема утилизации отработанных сталелитейных песчаных формовочных смесей (ОФС), или так называемых «горелых земель». По некоторым данным, на 1 т литья образуется от 5 до 13 т ОФС. С переходом российской экономики к модели «замкнутого цикла» ОФС из крупнотоннажных отходов становятся ценным вторичным ресурсом. Одним из возможных способов их переработки является регенерация, в результате которой формируются два основных продукта: рядовой формовочный песок и тонкодисперсная высокощелочная пыль (ВЩП). Существующий технологический процесс предполагает повторное использование песчаной фракции для изготовления формовочных масс (до 50 % песка) либо ее утилизацию и повторное использование в смежных отраслях, прежде всего в качестве заполнителя при производстве бетонов, при организации полигонов для размещения твердых отходов, в дорожном строительстве. Пылевую фракцию в настоящее время размещают в отвалах, однако можно ожидать, что ВЩП может стать ценным сырьем для изготовления динасовых огнеупоров, дополняя или частично заменяя традиционные минерализаторы: оксид кальция, оксид железа и их смеси.

Цель работы — исследование влияния ВЩП, образующейся в литейном производстве АО «Балаково-ЦЕНТРОЛИТ», на процессы фазо- и структурообразования в керамическом материале на основе диоксида кремния, имитирующем динасовый огнеупор. В качестве исходных материалов для изготовления образцов использовали регенерированный формовочный песок (РФП), ВЩП, тонкомолотый кварцевый песок ВС-050-16, измельченный в шаровой мельнице до удельной поверхности частиц 10 тыс. $\text{см}^2/\text{г}$, и контрольные минерализаторы: свежееобожженную известь ($A = 94\%$) из синтетического карбоната кальция (ГОСТ 8253–79) либо оксид железа (III) квалификации ч. РФП и ВЩП являются техногенными отходами с переменным составом, поэтому дополнительно определяли их характеристики методами гелиевой пикнометрии и рентгенофлуоресцентного анализа.

В технологии динасовых огнеупоров важнейшее значение имеет подбор зернового состава формовочной массы, поэтому авторы определяли размер частиц каждого из компонентов сухим способом по методике, аналогичной ГОСТ 8735–88. Средневзвешенный размер зерен РФП составил 0,67 мм, ВЩП 0,045 мм; гранулометрический состав опытных масс рассчитывали по уравнению Андреасена. Из масс одноосным полусухим

прессованием при давлении 100 МПа формовали образцы в виде цилиндров высотой 23 и диаметром 23 мм, которые обжигали в электрических печах в воздушной среде. Для составов, содержащих традиционные минерализаторы (CaO , Fe_2O_3), максимальная температура выдержки составляла 1400 °С, для составов с ВЩП и/или тонкомолотым песком — 1280 °С ввиду возможного формирования значительного количества маловязкого расплава.

По результатам рентгенофазового анализа и петрографических исследований, структура образцов, содержащих ВЩП, строится хорошо оформленными сростками тридимита с практически полным перерождением. Тридимитовый каркас плотный, с прерывистыми прослойками кристобалита, содержание которого не более 10 %. Кварц в структуре остова не наблюдается. При введении песка однородность структуры образцов нарушается, увеличивается содержание кристобалита; появляются аморфная стеклообразная фаза (расплав) и отдельные непереродившиеся зерна кварца.

В отсутствие ВЩП процесс перерождения тридимита протекает слабо. Образец без минерализаторов имеет видимую неоднородную структуру. Основной фазой в материале является β -кварц в виде крупных зерен; кристобалит не наблюдается, перерождение тридимита очень слабое, его содержание составляет 15–20 %. Введение минерализаторов ожидаемо интенсифицирует процесс тридимитизации, однако структура образцов остается неоднородной. В присутствии CaO материал строится кварцем, тридимитизация протекает слабо, неравномерно, кристаллы тридимита наблюдаются на поверхности зерен основной фазы. При введении Fe_2O_3 (7–8 %) в образце появляется примесь фаялита (7–8 %); присутствуют кристобалит, а также участки практически непереродившихся крупных зерен кварца размера 80–160 мкм (3–4 %).

Полученные данные о фазовом составе и микроструктуре образцов находятся в хорошем согласии с результатами расчета степени тридимитизации смесей. По-видимому, введение ВЩП действует аналогично традиционным минерализаторам (CaO и Fe_2O_3): тридимитизация протекает за счет перерождения через жидкую фазу. В присутствии ВЩП достигается максимальная степень тридимитизации (порядка 90 %), что отчетливо наблюдается в структуре образцов.

Таким образом, применение отходов регенерации отработанных сталелитейных жидкостеклопесчаных форм в виде пылевой фракции оказывается перспективным, поскольку позволяет повысить степень тридимитизации не менее чем на 10 % по сравнению с традиционными минерализаторами при снижении не ниже чем на 100 °С температуры обжига.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: bakor@ntcbakor.ru
E-mail: diolem@muctr.ru

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ СУШКИ НА СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКОН, ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ГОРЯЧИХ ГАЗОВ

© Д. Т. Н. Б. Л. Красный¹ (✉), К. Т. Н. К. И. Иконников¹, К. Ф.-М. Н. Д. Д. Бернт¹,
К. Т. Н. Д. О. Лемешев² (✉), А. С. Сизова¹, А. Л. Галганова¹, О. И. Родимов¹

¹ ООО «НТЦ «Бакор», Москва, г. Щербинка, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»,
Москва, Россия

Температура газов, отходящих от плавильных, стекловаренных и клинкерных печей, мусоросжигательных котлов, котельных и других тепловых агрегатов, составляет выше 1000 °С. Традиционную очистку высокотемпературных газов проводят с применением рукавных фильтров или электрофильтров, которые обладают высокой эффективностью. Однако температура их применения ограничена. При использовании фильтрационных способов очистки температуру газов снижают путем диспергирования в газодожде воды или подмешивания атмосферного воздуха. Это приводит к увеличению объема фильтруемого газа, а при диспергировании воды появляется необходимость создания замкнутой системы оборотной воды.

Для снижения энергозатрат при очистке горячих газов используют фильтрационные установки, содержащие в качестве фильтровальных элементов керамические фильтры на основе алюмосиликатных волокон. Это позволяет проводить фильтрацию газов без предварительного охлаждения; появляется возможность осуществлять рекуперацию тепловой энергии, что значительно повышает эффективность использования невозобновляемых источников энергии.

Для возможности очистки высокотемпературного газа фильтрующий элемент должен обладать одновременно высокой термостойкостью, проницаемостью и механической прочностью. Для достижения таких показателей термостойкое связующее, скрепляющее волокна в каркас, должно равномерно распределяться по толщине стенки фильтра. Это существенно зависит от метода сушки, используемого при изготовлении фильтра. В процессе сушки частицы связующего вместе с влагой диффундируют на нагреваемую поверхность и скапливаются у внешней стенки фильтра, создавая непроницаемый слой; это уменьшает проницаемость фильтра. Прочность внешнего слоя волокон, не скрепленных связующим, невелика, как и суммарная прочность элемента.

В НТЦ «Бакор» изготовили серию керамических фильтрующих элементов (ФЭ) с применением разных методов сушки. Микроволновую сушку и сушку после

заморозки использовали для уменьшения миграции связующего, конвективную сушку — для сравнения результатов и оценки эффективности снижения миграции. Использование метода заморозки с последующей конвективной сушкой обосновано свойством кремнезоль при заморозке необратимо превращаться в гель, в результате чего миграция связующего при дальнейшей сушке снижается.

В качестве исходных компонентов использовали алюмосиликатные волокна (Al₂O₃ 46,0 %, SiO₂ 53,5) диаметром 1,29–17,3 мкм и длиной 84 мкм–19 мм. Катионный крахмал использовали в качестве временного технологического связующего, золь диоксида кремния (концентрация SiO₂ 35 мас. %, диаметр мицелл 10,0–15,0 нм, pH 8,8–10,4) — в качестве высокотемпературного связующего. ФЭ на основе алюмосиликатного волокна были изготовлены методом вакуумной фильтрации с последующей обточкой заготовки, пропиткой золью оксида кремния и сушкой разными методами.

Прочность на разрыв ФЭ испытывали на образцах, вырезанных из стенок ФЭ и термообработанных при 1000 °С (предположительная эксплуатационная температура). Для определения миграции связующего при сушке на образцы наносили насечки для нарушения сплошности внешнего слоя стенки элемента. Аэродинамическое сопротивление ФЭ оценивали по разнице давления воздуха при входе в ФЭ и при выходе из него, отнесенной к площади фильтрующей поверхности фильтра. Свойства полученных изделий, изготовленных с применением разных методов сушки, приведены в таблице.

Микроволновая сушка и заморозка ФЭ с последующей конвективной сушкой не устраняют миграцию связующего полностью, но позволяют снизить ее интенсивность. ФЭ, изготовленные с применением этих методов сушки, характеризуются структурной однородностью, более низкими значениями аэродинамического сопротивления, а также относительно высокой механической прочностью даже при нарушении сплошности внешнего слоя стенки ФЭ.

Показатель	Конвективная сушка	Микроволновая сушка	Заморозка с последующей конвективной сушкой
Прочность при разрыве образцов ФЭ, МПа:			
без нарушения сплошности внешнего слоя стенки ФЭ	0,35±0,05	0,48±0,08	0,57±0,07
с нарушением сплошности внешнего слоя стенки ФЭ	0,04±0,02	0,44±0,06	0,52±0,06
Аэродинамическое сопротивление ФЭ при удельном расходе воздуха 100 м ³ /(м ² ·ч), Па	700±50	410±50	490±50

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ТЕРМОСТОЙКАЯ КЕРАМИКА КОРДИЕРИТОВОГО
И МУЛЛИТОКОРДИЕРИТОВОГО СОСТАВОВ**(✉)
E-mail: chemic@yandex.ru

© Н. С. Лебедев (✉)

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

С точки зрения синтеза термостойких керамических материалов с высокой устойчивостью к агрессивным химическим реагентам и низким ТКЛР перспективной является система $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, в которой имеется тройное соединение кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), обладающее малым ТКЛР в широком диапазоне температур. Синтез кордиеритовой и муллитокордиеритовой керамики обычно проводят высокотемпературным обжигом шихты, содержащей в разных соотношениях глинозем, тальк и огнеупорную глину (каолин). Термостойкие кордиеритсодержащие материалы рационально использовать в условиях резких колебаний температур и воздействия агрессивных реагентов, поэтому они широко применяются при изготовлении термостойкой химической посуды, электрокерамики, пористых носителей катализаторов, керамических фильтров, распределительных насадок и др.

За последние десятилетия проведено множество научно-прикладных исследований в области керамических материалов, содержащих кордиерит. Однако в

России на сегодняшний день не существует промышленного производства кордиеритовой керамики, соответствующей мировым стандартам. Основными недостатками известных российских аналогов являются: малое содержание кордиерита в полученных изделиях (<50 мас. %), высокая стоимость сырьевых материалов (часто импортных), низкая прочность изделий в интервале низких температур, узкий температурный диапазон спекания.

На кафедре ХТТНиСМ СПбГТИ(ТУ) разработана методика получения термостойкой кордиеритовой и муллитокордиеритовой керамики с содержанием кордиерита до 80 мас. % и широким диапазоном пористости (открытая пористость 1,0–25,0 %). Керамика характеризуется кажущейся плотностью 1,70–2,40 г/см³ и высокой термостойкостью (> 20 теплосмен 950 °С–вода). Следует отметить, что для производства термостойкой кордиеритовой и муллитокордиеритовой керамики предлагается использовать только доступное отечественное сырье.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ШЛИКЕР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
СЛОЖНОЙ ОБЪЕМНОЙ ФОРМЫ**(✉)
E-mail: chemic@yandex.ru

© Я. О. Наревич (✉)

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время интенсивно развиваются технологии получения керамических изделий (в том числе крупногабаритных), обладающих сложной объемной формой. Такие изделия предназначены для службы в условиях высоких температур и механических нагрузок, в агрессивных средах. Традиционными методами формования производство таких изделий практически невозможно, однако подобные изделия на основе керамических материалов успешно создаются с применением аддитивных технологий.

Известны разные способы получения керамических изделий сложной объемной формы с высокими техническими и функциональными характеристиками с применением современных процессов 3D-печати. Некоторые из них включают предварительное изготовление мягкой силиконовой матрицы методом отливки жидкого силикона в форму, созданную из термопластичного материала (пластика) по технологии 3D-печати. В силиконовую матрицу заливается керамический шликер (как правило, термопластичный) с последующей термообработкой, удалением силиконовой оболочки, механической обработкой за-

готовки изделия и окончательным его высокотемпературным обжигом (пат. US 2005/0023710, B29C 35/08; RU 2641683).

Силиконовая матрица, используемая для заливки керамического шликера, обладает упругостью и эластичностью. Ее поверхность шликером не смачивается, что снижает вероятность возникновения дефектов изделий. В подобных технологиях одним из важнейших параметров является усадка сырца изделия. Даже с учетом эластичности матрицы незначительная усадка (до 1 %) способна вызвать механические напряжения, приводящие к фрагментации заготовки.

На кафедре ХТТНиСМ СПбГТИ(ТУ) разработан состав керамического шликера для получения плотной и прочной корундовой керамики (открытой пористостью 10–23 %), обладающий практически нулевой усадкой в процессе затвердевания в пластиковой или силиконовой форме. Минимальная усадка достигается за счет применения добавок, формирующих рыхлую структуру при термическом удалении дисперсионной среды, и тщательного подбора фракционного состава твердой фазы шликера.

Предлагается нетрадиционный вариант комплексной, прогнозной, количественной оценки относительной стойкости огнеупорных материалов на основе синергетической взаимосвязи трех главных факторов: теплофизического (температура плавления или огнеупорность), термодинамического (энергия Гиббса для оксидов или атомизации для элементов и бескислородных соединений) и кристаллохимического (молярный или атомный объем).

Главным источником информации для создания новых, более эффективных и совершенствования существующих огнеупоров являются сведения о механизме и кинетике износа футеровки в процессе ее эксплуатации в разных тепловых агрегатах. В зависимости от природы фазово-структурных превращений, протекающих при эксплуатации огнеупоров в разных средах и условиях, ранее нами установлены восемь видов износа: 1 — высокотемпературная химическая коррозия; 2 — термическое скалывание; 3 — структурное разупрочнение; 4 — оплавление; 5 — пиропластическая деформация; 6 — расплавная эрозия; 7 — газофазная сублимация и эрозия; 8 — механическое разрушение. На долю двух первых видов износа приходится в сумме 80–90 % случаев выхода футеровки из строя. Как правило, в реальности происходит синхронное сочетание воздействия нескольких типов износа.

При всех видах износа определяющее значение для ресурса работы огнеупора имеют его теплофизические свойства, в первую очередь температура плавления (огнеупорность) и ТКЛР. Второй фундаментальной характеристикой является термодинамическая прочность: энергия Гиббса (ΔG_T°) для соединений с ионно-ковалентной связью в кристаллах или энергия атомизации (A°) для металлов и бескислородных соединений, в которых преобладает металлическая или ковалентная связь соответственно.

Анализ кинетики износа разных огнеупоров в идентичных условиях эксплуатации показал, что часто даже более тугоплавкие и термодинамически более прочные минералы имеют меньшую стойкость в сравнении с более легкоплавкими соединениями с более высокими значениями термодинамического потенциала. Оказалось, что причиной данного парадокса является кристаллохимический фактор — резко различающийся молярный объем соединений (V). Например, V графита 5,3 см³/моль, а корунда 25,6 см³/моль. Молярный объем V соединения, см³/моль, равен отношению молярной массы M к его истинной плотности $\rho_{\text{ист}}$:

$$V = M/\rho_{\text{ист}}$$

и представляет собой важнейший универсальный интегральный кристаллохимический параметр простого вещества, включающий атомные массы всех элемен-

тов, входящих в его состав, радиусы атомов, ионов, расстояния между ними и тип химической связи в кристаллах. Он отражает число грамм-молекул (или грамм-атомов) в 1 см³ соединения (молярная концентрация вещества).

Кристаллохимия и химическая термодинамика — родственные науки, изучающие свойства твердого вещества с позиции атомно-молекулярного строения («архитектура» кристалла) и его энергетического потенциала соответственно. Количественно эту тесную связь наук целесообразно представить в виде отношения Энергии Гиббса ($-\Delta G_T^\circ$) к молярному (или атомному для элементов) объему V :

$$E = -\Delta G_T^\circ/V,$$

где E (названа нами *энергоплотностью*) — количество энергии в 1 см³ кристалла, кДж/см³. E — новый параметр оценки химической активности, теплофизических, механических и других свойств кристаллов.

Так как у всех огнеупоров главное теплофизическое свойство — температура плавления, зависящая как от их кристаллохимии, так и от термодинамической прочности, то для полной характеристики износоустойчивости I , кДж·град/см³, тугоплавкого минерала включим в формулу энергоплотности E (в виде дополнительного сомножителя) температуру плавления минерала $T_{\text{пл}}$: $I = T_{\text{д}} = E \cdot T_{\text{пл}}$. Полученная термоэнергетическая константа минерала $T_{\text{д}}$, названная нами *термоэнергоплотностью*, характеризует плотность энергии в 1 см³ кристалла с учетом его температуры плавления.

Минерал	Химическая формула	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	E , кДж/см ³	$T_{\text{д}}, 10^3$ кДж·град/см ³
Графит	C	3800*	104,7	397,9
Карбид кремния	$\alpha\text{-SiC}$	2830*	100,8	285,3
Бромеллит	BeO	2570	68,5	176,1
Бадделейт	ZrO ₂	2700	52,9	150,1
Торианит	ThO ₂	3300	44,3	146,2
Периклаз	MgO	2800	50,9	142,3
Оксид гафния	HfO ₂	2780	50,6	140,7
Корунд	Al ₂ O ₃	2050	61,4	125,9
Церианит	CeO ₂	2727	43,2	117,8
Шпинель	MgAl ₂ O ₄	2135	55,1	117,6
Уранинит	UO ₂	2750	42,0	115,2
Бонит	CaO·6Al ₂ O ₃	1850	57,6	106,6
Ларнит	$\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$	2135	49,2	104,8
Обожженный доломит	CaO·MgO	2450	42,3	104,1
Известь	CaO	2625	36,9	94,7
Муллит	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1910	47,6	91,0
Форстерит	Mg ₂ SiO ₄	1890	46,9	88,6
Магнохромит	MgCr ₂ O ₄	2330	37,7	87,8
Эсколаит	Cr ₂ O ₃	2265	35,9	82,5
Кварц	SiO ₂	1713	29,6	50,7

* Температура сублимации, $^\circ\text{C}$.

Материаловедческое изучение лабораторных образцов при испытаниях на расплавоустойчивость и огнеупоров после эксплуатации в промышленных плавильных, нагревательных печах и во многих других тепловых агрегатах показало сильную положительную корреляционную зависимость ($R = 0,75 \div 0,9$) между продолжительностью кампании футеровки тепловых агрегатов и величиной термоэнергоплотности огнеупорных минералов, составляющих эту

футеровку. Относительная расчетная износоустойчивость некоторых огнеупорных минералов приведена в таблице.

Наиболее высокую относительную расчетную термоэнергоплотность и износоустойчивость имеют бескислородные соединения графит и карбид кремния, среднюю — ZrO_2 , MgO и Al_2O_3 , низкую — кварц, что подтверждается практикой службы футеровки в экстремальных условиях эксплуатации.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВНЕДРЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАСКАЛЫВАНИЯ КЛИНОМ ПРИ ИСПЫТАНИИ ОГНЕУПОРОВ

(✉)

E-mail: aplatonov@magnezit.com

© А. А. Платонов (✉), С. Б. Меркурьева, Е. Ф. Чайка, Л. М. Михайловская
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

В связи с расширением на мировом рынке спроса на более качественные виды огнеупорной продукции для футеровки тепловых агрегатов становится актуальным вопрос о совершенствовании методов испытаний огнеупоров. Таких показателей, как прочность, термостойкость, деформация зачастую недостаточно для корректного прогнозирования служебных свойств огнеупоров; требуется их оценка по другим показателям, в частности, по их стойкости к развитию трещин.

В лаборатории материаловедения технического управления Группы Магнезит внедрена методика определения предела прочности при разрушении клином (расклинивание) огнеупорных изделий. Из изделий разных марок изготавливают образцы размерами $100 \times 100 \times 60$ мм. На одной из торцевых сторон делают пропи́л (25×25 мм), по центру которого формируется зарубка толщиной около 4 мм. В пропи́л вставляют металлические опорные пластины, два ролика и клин. Металлические опоры через ролики передают вертикальную нагрузку клина на образец, преобразуя ее в горизонтальную нагрузку, что приводит к расклиниванию образца.

В ходе всего процесса трещинообразования регистрируются прилагаемая нагрузка и размер образующейся трещины (раскрытие образца, смещение). Метод позволяет рассчитать удельную энергию упругой деформации G_f , предел прочности при растяжении $\sigma_{нт}$, хрупкость материала χ . Хрупкость в данном случае — это попытка оценить сопротивление материала к распространению трещины. Чем ниже значение χ , тем более хрупкий образец, поэтому он сильнее склонен к взрывному растрескиванию и образованию одной сквозной трещины.

В таблице приведены результаты расчетов $\sigma_{нт}$, G_f и χ , а также пределов прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ и изгибе σ_f огнеупорных материалов составов I и II.

Из анализа полученных результатов видно, что разрушение изделий разных марок сильно отличается друг от друга:

• В образцах огнеупора состава I наблюдается быстрое разрушение, что характерно для квазихрупкого материала. После достижения предела прочности тре-

щина в таких огнеупорах формируется практически мгновенно, причем некоторые образцы полностью раскалываются на две части.

• В образцах огнеупора состава II наблюдается медленное разрушение с постепенным ростом трещины, что характерно для менее хрупкого материала. Во время воздействия нагрузки в таких огнеупорах, по всей видимости, у основной трещины появляются многочисленные ответвления (сеть микротрещин), компенсирующие часть нагрузки в сформированном поровом пространстве огнеупора.

Таким образом, метод расклинивания позволяет более полно охарактеризовать процесс возникновения трещин и детально изучить механизм разрушения огнеупоров.

Из анализа полученных результатов видно, что разрушение изделий разных марок сильно отличается друг от друга:

• В образцах огнеупора состава I наблюдается быстрое разрушение, что характерно для квазихрупкого материала. После достижения предела прочности трещина в таких огнеупорах формируется практически

Образец	G_f , Н/м	$\sigma_{нт}$, Н/мм ²	χ	$\sigma_{сж}$, Н/мм ² (по ГОСТ 4071.1–2021)	σ_f , Н/мм ² (по ГОСТ 31040–2002)
<i>Огнеупор состава I</i>					
1	913,4	14,76	61,86	43,2	14,8
2	756,0	12,06	62,66	42,6	12,1
3	769,3	14,10	54,55	43,8	14,6
4	712,2	15,22	46,78	38,5	14,7
5	802,6	15,32	52,40	41,4	15,8
Среднее значение	790,7	14,3	55,7	41,9	14,4
<i>Огнеупор состава II</i>					
1	564,2	6,39	88,3	42,9	5,3
2	356,2	5,06	70,4	47,0	4,9
3	371,9	4,49	82,9	38,0	3,9
4	222,1	5,03	44,1	47,0	5,5
5	347,0	5,92	58,6	46,8	5,1
Среднее значение	373,3	5,4	68,9	44,3	4,7

мгновенно, причем некоторые образцы полностью раскалываются на две части.

• В образцах огнеупора состава II наблюдается медленное разрушение с постепенным ростом трещины, что характерно для менее хрупкого материала. Во время воздействия нагрузки в таких огнеупорах, по всей видимости, у основной трещины появляются

многочисленные ответвления (сеть микротрещин), компенсирующие часть нагрузки в сформированном поровом пространстве огнеупора.

Таким образом, метод расклинивания позволяет более полно охарактеризовать процесс возникновения трещин и детально изучить механизм разрушения огнеупоров.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: RudenokLP@virial.ru

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПЛАКИРОВАННОГО ПОРОШКА cBN ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

© Л. П. Руденок¹ (✉), В. А. Хорев^{1,2}

¹ ООО «Вириал», Санкт-Петербург, Россия

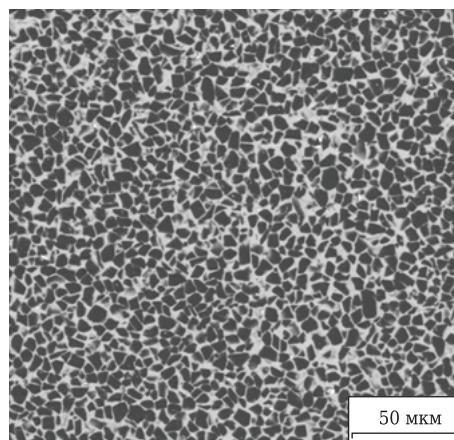
² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

Композиционные материалы на основе кубического нитрида бора со связками на основе тугоплавких соединений титана перспективны при создании термически стабильного высокотвердого режущего инструмента, устойчивого к ударным и коррозионным воздействиям. Присутствие в матрице тугоплавких соединений, обладающих повышенной твердостью и трещиностойкостью, позволяет затормозить процессы рекристаллизации и перерождения кубического нитрида бора в гексагональный, а также уменьшить дробление зерен кубического нитрида бора при сдавливании их связкой.

Один из методов образования связки на основе тугоплавких соединений титана в композите заключается в плакировании порошка cBN титаном, последующем формовании и спекании заготовки методом «high pressure high temperature» (HPHT). При плакировании в результате химического газофазного осаждения на поверхности зерен *m*BN образуются сплошные покрытия толщиной 140–370 нм в зависимости от условий проведения процесса.

В результате спекания методом HPHT получен композиционный материал с микроструктурой, характеризующейся равномерным распределением зерен cBN (см. рисунок, темное) в боридно-нитридной матрице и высокопрочной тугоплавкой связкой (светлое). Из полученного материала изготавливали пластины формы RNMN 050300 в соответствии с ISO 513 для исследований физико-механических свойств и проведения испытаний на работоспособность. Физико-механические свойства пластин с содержанием cBN 60 / 58 мас. % / об. %: плотность 4,1 г/см³, *HV* (38,1±2,3) ГПа, модуль упругости 640 ГПа; при максимальной нагрузке на индентор образование трещин на пластинах не зафиксировано.

Испытания материала на работоспособность проводили при обработке инструментальной стали марки



ХВГ ГОСТ 5950–2000 твердостью 59–60 HRC без использования СОЖ при режиме: скорость 110 м/мин, подача 0,1 мм/об, глубина резания 0,5 мм, время точения 90 с. Критериями работоспособности режущего инструмента являлись износ пластины по задней грани, не превышающий 100 мкм, а также отсутствие сколов по передним и задним поверхностям.

Пластины успешно прошли испытания на работоспособность: полоска износа имеет равномерную толщину; износ по задней грани пластины составил 40 мкм.

* * *

Работа выполнена в ходе плановых НИР ООО «Вириал» при участии Санкт-Петербургского технологического института (технический университет).

КЕРАМИЧЕСКИЕ АЛЬГИЦИДНЫЕ КРОВЕЛЬНЫЕ ГРАНУЛЫ
ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД(✉)
E-mail: sersok_07@mail.ru© Д. т. н. В. Н. Соков¹ (✉), А. С. Алматов², К. т. н. Е. А. Рамазанов³¹ ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия² Корпорация «ТехноНиколь», Москва, Россия³ Инженерная академия Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан

До недавнего времени в РФ не существовало производства керамизированных кровельных гранул как продукта. Основой получения таких гранул является формирование на минеральном носителе (горной породе) защитно-декоративной оболочки, полученной путем термообработки композиции на основе жидкого силикатного стекла. Такие гранулы должны иметь в своей оболочке химические элементы, препятствующие биообрастанию и разрушению защитного слоя. Для устранения разрушения кровельных гранул требуется выбирать горные породы, не подверженные деструктивным изменениям при температурном режиме технологического цикла и не содержащие реакционных минералов типа карбонатов. Если порода выбрана неправильно, то защитный слой не работает и кровельный материал разрушается.

Установлены критерии выбора горных пород России с определенной минеральной формой фиксации железа. Разработана шкала термогравиметрической активности породы. Технология производства предполагает нанесение двух слоев: внутренний слой содержит биоцид в виде медно-цинковой латуни, керамическая оболочка формируется из раствора каолина, пигментов и натриевого жидкого стекла. После обжига керамизированные гранулы покрываются цветной нерастворимой оболочкой. Растворимость оболочки гранул определяется их поверхностной щелочностью.

Определены минералы, способствующие изменению цвета кровельных гранул в пределах операционных температур. Установлено, что изменение цвета кровельных гранул при эксплуатации происходит из-за выделения на их поверхности оксигидроксидов железа. Выявлено, что не химический состав горной породы является определяющим при оценке ее пригодности в производстве кровельных гранул, а структурная форма минеральной фиксации в ней железа. Порода (носитель) должна полностью задерживать ультрафиолетовое излучение, обладать химической и физической инертностью, которая обеспечивает стойкость при кислых дождях, отсутствие высолов, стойкость к циклам замораживания/размораживания и намокания/высыхания, отсутствие ржавчины.

Поставленные цели достигнуты путем сопоставления данных по химическому и минеральному составу горных пород с данными по изменению цвета и минерального состава в результате прогрева пород до технологической температуры 550 °С, при которой происходит спекание керамической оболочки в производственном процессе. Таким требованиям удовлетворяет базальт Сангалыкского и Орского месторождений России.

Керамическая оболочка формируется из раствора каолина, пигментов и натриевого жидкого стекла. При нагревании происходит выход ионов натрия из жидкого стекла и алюминия из каолинита, что приводит к новообразованию слюистой кристаллической фазы. В результате обжига получаются минеральные частицы, покрытые цветной нерастворимой оболочкой. При обжиге в оболочке гранул происходят преобразования: дегидратация красящего раствора и деструкция каолина с выделением ионов алюминия. В результате преобразований керамическая оболочка переходит в нерастворимое состояние. На этот показатель влияет температура обжига. В результате сопоставления поверхностной щелочности и количества растворимых солей установлена оптимальная технологическая температура обжига (550 °С). Дальнейший нагрев приводит к образованию в керамической оболочке свободных растворимых солей.

Рассчитаны частота вращения барабана печи и длительность обжига гранулированной смеси в зависимости от расхода газового топлива форсунки. Длительность продувки и обжига смеси, в свою очередь, определяется распределением поля температур и скоростей двухфазной среды (смесь гранул — нагретая газовая смесь продуктов горения газового топлива и воздуха) для каждого поперечного сечения (вдоль оси) печи и для каждого выбранного момента времени. Ограничениями, определяющими длительность продувки и обжига смеси и соответствующее распределение поля температур среды в печи, являются прочностные характеристики гранул и их цвет.

Рассчитано количество теплоты, необходимое и достаточное для нагрева массы гранул до определенной температуры. Средняя выдержка гранул в печи 17 мин. В это время идут термохимические процессы упорядочения структуры гранул, окислительные и восстановительные реакции и другие эндогенные реакции на поверхности гранулы. Из-за высокой скорости изменения температуры на поверхности гранулы произойдет ее деструкция; возможно и разрушение. Для оценки устойчивости полученных гранул к биопоражению проведено их тестирование. Биоцидные гранулы характеризуются стойкостью к биопоражению, сопоставимой с эталоном, и устойчивы к биообрастанию в течение сравнимого с эталоном срока. Это связано с явлением селективной коррозии медно-цинковых латуней.

Температура в печи в среднем постоянная в каждой точке пространства в течение всего технологического процесса, что соответствует его требованиям. В

зоне загрузки гранул температура по оси печи повышается достаточно медленно, т. е. градиент температур невысок.

Предлагаемый в качестве биоцида латунный порошок представляет собой медно-цинковый сплав с размерами частиц от 5 до 75 мкм; содержание цинка

в нем от 15 до 30 мас. %. Общее количество вводимого в композицию биоцида составляет от 4,5 до 60 кг/т основы. Меньшее количество порошка не обеспечивает достаточную защиту керамических гранул от биообрастания, а большее нецелесообразно по экономическим причинам.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: sersok_07@mail.ru

ТЕРМОДИНАМИКА САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ МАСС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

© Д. Т. Н. В. Н. Соков (✉), К. Т. Н. С. Д. Сокова

ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

Способ получения самоуплотняющихся масс предполагает использование замкнутого объема (с перфорированными стенками или без). Теплота в формовочную массу может передаваться либо контактным путем (кондуктивно) через стенки формы, либо генерироваться непосредственно в смеси за счет воздействия на нее электромагнитными полями токов промышленной или высокой частоты.

Исходя из первого начала термодинамики, теплота, сообщаемая самоуплотняющимся массам, находящимся в замкнутом объеме, расходуется на изменение внутренней энергии, создавая поля (градиенты) температур, давлений и влажности. Система и ее микроскопические части начинают движение; происходят изменения ее кинетической энергии и параметров состояния, характеризующих направленное протекание процесса теплообмена в замкнутой форме. Совершаемая при этом работа направлена на удаление физически связанной влаги через перфорацию формы и дрейфа твердых минеральных частиц с уплотнением межпоровых перегородок.

От традиционных способов тепловой обработки формовочных масс (сушки) процесс самоуплотнения отличается тем, что влага фильтруется в материале в виде жидкой фазы за счет градиента давлений. При этом интенсивность фильтрационного массопереноса на 3–4 порядка выше, чем перенос теплопроводностью. Массоперенос при самоуплотнении осложняется изменением фильтрационных характеристик среды. Применение положений теории фильтрационной консолидации к процессу самоуплотнения позволило получить аналитические зависимости между фильтрационными характеристиками материала и величиной прилагаемого давления.

Механизм влагопереноса при самоуплотнении имеет ряд существенных отличий от традиционных способов. Во-первых, самоуплотнение (как правило) осуществляется при температурах ниже 100 °С и всегда при избыточном давлении, что предопределяет отсутствие фазовых превращений влаги, распределенной в матрице. Во-вторых, в зависимости от уплотняющего компонента, а следовательно, и величины давления, развиваемого в системе, преобладающими потоками влаги являются потоки, определяющиеся

градиентами температуры и давления. Поток влаги, связанный с градиентом влажности, либо меньше, либо значительно меньше двух первых и практически всегда направлен в противоположную сторону.

Влияние поля температур проявляется в нескольких направлениях: во-первых, в процессах, связанных непосредственно с теплопереносом и генерированием тепла внутренними источниками, во-вторых, — в формировании поля давлений, в-третьих, — в модификации реологических характеристик матрицы и ее структуры. При электропрогреве масс необходимо учитывать и четвертый фактор, участвующий в формировании гидротеплосилового поля, — электрическое поле, а именно, напряженность его в каждой точке. В изучаемых системах токопроводящей средой является жидкая фаза с растворенными в ней компонентами матрицы. Концентрация и состав токопроводящей фазы изменяются как во времени (уменьшаются в процессе влагоотжатия), так и в пространстве (в разных зонах уплотняемого объема). В качестве меры этого явления можно рассматривать удельное электрическое сопротивление смеси в данном микрообъеме, которое зависит от влажности массы, его химического состава и температуры. В этом случае количество теплоты, выделившееся в данном микрообъеме в единицу времени, можно считать пропорциональным квадрату напряженности электрического поля и обратно пропорциональным удельному электрическому сопротивлению массы.

При расчете параметров процесса использовали понятие квазиизотропной среды, состоящей из элементарных объемов, и метод конечных разностей. Установлена взаимосвязь напряженного состояния в системе (в данном микрообъеме и в данный момент времени), обусловленного фильтрационным массопереносом, с интенсивностью формирования поля давлений (в результате нагрева смеси) и его релаксации.

При самоуплотнении снижение влажности массы происходит не из-за обезвоживания капилляров, а за счет сокращения их размеров и деформации в поле сил давления. Процесс отжатия влаги продолжается до тех пор, пока капиллярная влага не будет полностью удалена из материала и пока капиллярное противодавление не превысит давление уплотнения.

Таким образом может быть удалена вся усадочная влага. По результатам экспериментов по изучению процессов тепло- и массопереноса в условиях самоуплотнения масс установлено следующее:

- основным видом переноса влаги в среде с изменяющимися фильтрационными характеристиками является перенос ее в виде жидкости под действием градиента давления;

- степень уплотнения системы определяется работой против сил капиллярного противодействия и зависит от величины прилагаемого давления, развиваемого при самоуплотнении масс;

- на конечный объем отжимаемой из формовочных масс влаги влияют скорость электропрогрева и водопотребность глинистого теста. При скорости прогрева выше 0,15 °С/мин наблюдается снижение конечного объема отжимаемой влаги из-за защемления ее во внутренних слоях материала;

- скорость влаготжата прямо пропорциональна скорости роста давления.

Практическая адаптация изложенных положений предполагает решение комплекса задач, которые могут быть классифицированы по следующим направлениям:

- влияние электрогидротеплосилового воздействия (ЭГТСВ) на системы с разной вещественной структурой матрицы на основе многообразного огнеупорного сырья;

- влияние ЭГТСВ на физические и физико-химические процессы, протекающие в матрице: реологию смесей, химические превращения в них, консолидацию в условиях напряженного состояния и т. п.;

- влияние разных видов уплотняющих компонентов и разных способов подвода теплоты на закономерности формирования ЭГТСВ.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: chemic@yandex.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ И ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ ШЕСТИКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$

© Д. т. н. С. А. Суворов, к. т. н. В. В. Козлов (✉), А. В. Иванов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

Одна из основных причин износа огнеупорных материалов шлакового пояса футеровки металлургического агрегата — шлаковая коррозия, которая является результатом физико-химического взаимодействия сталеплавильного шлака с поверхностью огнеупора. Агрессивность шлака по отношению к огнеупору определяется главным образом растворимостью фаз огнеупора в шлаковом расплаве. Если рассматривать шлаковую коррозию периклазоуглеродистой футеровки, то огнеупорная фаза, переходящая из твердого состояния в жидкий расплав, — периклаз. Углеродистая составляющая подвергается окислению кислородом атмосферы и оксидами железа шлака и газифицируется в виде CO и CO₂. Переход оксида магния в шлаковый расплав возможен только до состояния насыщения, когда его концентрация соответствует растворимости (которая определяется химическим составом и температурой шлака). Определение концентрации растворимости огнеупорных оксидов в шлаковых расплавах является важной технологической задачей для ресурсосберегающей эксплуатации

огнеупорных материалов в тепловых агрегатах черной металлургии.

На кафедре ХТН и СМ СПбГТИ(ТУ) разработаны математическая модель и программное обеспечение для моделирования субсолидусного равновесного фазового состава сталеплавильных шлаков и систем шлак-огнеупор, концентрации насыщения огнеупорных фаз в шлаковых расплавах в рамках системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$. Правильность предложенного математического подхода подтверждена результатами экспериментального исследования методом рентгенофазового анализа синтетических шлаков состава, типичных для сталеплавильных процессов.

Разработанное решение предназначено для оптимизации шлакового режима плавки, позволяющей замедлить шлаковую коррозию и повысить ресурс футеровки, стабилизировать металлургические шлаки, снизить их экологическую нагрузку, управлять субсолидусным фазовым составом шлаков для применения их в качестве сырья для изготовления строительных материалов.

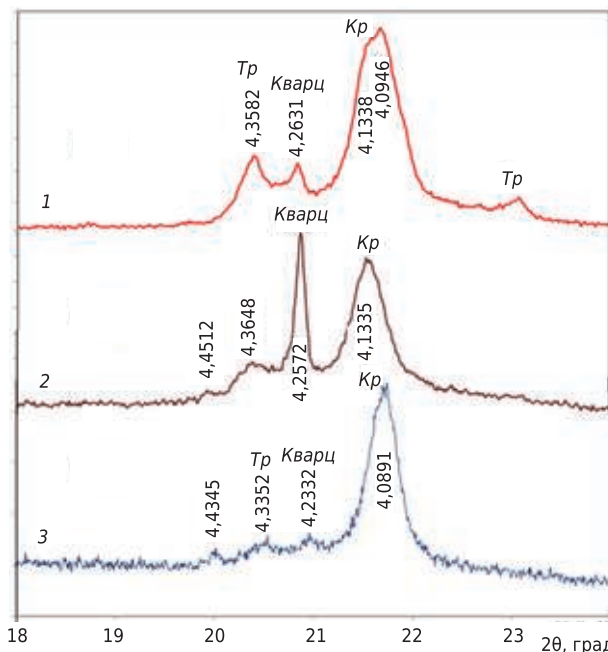
ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ОБМУРОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ФОСФАТНЫХ СВЯЗКАХ(✉)
E-mail: marinarumi@yandex.ru© Э. М. Уразаева, к. х. н. М. Х. Руми (✉), Э. П. Мансурова, Ш. К. Ирмаева, М. А. Зуфаров,
к. т. н. Ш. Р. Нурматов, к. т. н. Ш. А. Файзиев

Институт материаловедения НПО «Физика–Солнце» АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан

Научные и технические задачи, связанные с получением теплоизоляционных и футеровочных материалов, могут быть решены путем подбора технологических приемов их получения и эффективного использования при этом всех видов ресурсов. Особенностью сырьевой базы Узбекистана, несмотря на многообразие глинистого и непластичного местного сырья, является отсутствие тугоплавких минеральных ресурсов, что требует вовлечения техногенных высокоглиноземистых отходов при создании теплоизоляции с высокой огнеупорностью. В производстве материалов для теплоизоляции и футеровки тепловых агрегатов следует также отметить постоянный рост доли безобжиговых изделий, в том числе жаростойких неформованных огнеупоров, которые спекаются в процессе службы и приобретают заданные свойства в результате химического твердения. Технологический прием введения в огнеупорную массу наполнителей как плотных, так и с собственной высокой пористостью весьма эффективен для регулирования кажущейся плотности и упрощения процессов формования и обжига изделий.

В данной работе проведена серия экспериментов по углубленному исследованию фазовых превращений, протекающих при химико-термическом твердении матрицы материала для обмуровки. Были изготовлены образцы как с плотным наполнителем (лом корундовых изделий марки КСП-85), так и с пористым (перлит, керамзит). В качестве связующего использовали смесь из глинозема, вторичного каолина (содержание Al_2O_3 27–29 мас. %) и ортофосфорной кислоты (75 %-ной). Смеси были сформованы набивкой и подвергнуты нагреву при 1000 °С с длительной выдержкой. Анализировали влияние вида наполнителя, а также количества керамического связующего и ортофосфорной кислоты на структуру и состав фосфатно-керамического связующего.

Результаты рентгенофазового анализа связки показали образование основной кристаллической, стабильной при высоких температурах, фазы $AlPO_4$ кристобалитового типа (Кр, 4,09–4,13 Å), а также небольшого количества высокотемпературной фазы $AlPO_4$ тридимитового типа (Тр, 4,33–4,36 Å), количество которых на рентгенограммах пропорционально количеству введенной химической связки на основе ортофосфорной кислоты (см. рисунок). Отмечаются также отражения, принадлежащие тетраметафосфату алюминия $Al(PO_3)_3$, и гало, свидетельствующие о существовании аморфной фазы. Характерная микроструктура содержит фрагменты двух типов — округлые симметричные зерна размерами до 10 мкм



Участки дифрактограмм алюмофосфатного связующего для составов на основе перлит-керамзитового (1) и корундового наполнителя (2, 3)

(участок 1) и конгломераты размерами 1–2 мкм (участок 2).

В химическом соединении $AlPO_4$ массовое отношение алюминий : фосфор составляет 0,87. Для участка 1 оно равно 0,86, для участка 2 0,97, что с большой вероятностью указывает на присутствие фосфатного связующего с этим отношением. Результаты микрозондового анализа структуры двух участков, содержащих фрагменты двух типов, указывают на присутствие зерен наполнителя, покрытых алюмофосфатной связкой соединения $AlPO_4$ (см. таблицу).

Элемент/оксид	Участок 1	Участок 2
Al / Al_2O_3	5,5 / 10,4	8 / 15,1
P / P_2O_5	6,4 / 14,7	8,2 / 18,8

В общем виде в составе химико-керамического связующего при нагреве до 1000 °С происходят следующие изменения: затвердевшая алюмофосфатная связка характеризуется метастабильностью; наблюдается присутствие нескольких кристаллических фаз алюмофосфата; на структуру кристобалита $AlPO_4$ влияет состав наполнителя и керамической связки, что является причиной больших подвижек в межплоскостном расстоянии вплоть до присутствия дуплета кристобалитового типа.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ПОВЫШЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ УГЛЕГРАФИТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ**

(✉)

E-mail: o.o.erokhina@gmail.com

© К. Т. н. **Р. Ю. Фещенко, О. О. Ерохина** (✉), **Н. А. Пирогова**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», факультет переработки минерального сырья, Санкт-Петербург, Россия

Углеродистые изделия нашли широкое применение в металлургии в качестве электродов и огнеупорных материалов. Окисление графита негативно влияет на технологический процесс, а также приводит к увеличению эмиссии парниковых газов, поэтому повышение окислительной стойкости графита является важной задачей.

Для оценки окислительной стойкости электродного графита разработана установка для исследования потерь массы укрупненных образцов при варьируемом расходе воздуха в диапазоне от 700 до 1200 °С. Установлено, что механизм окисления графита является диффузионным, что подтверждается влиянием расхода воздуха на скорость окисления; при этом энергия активации составила 17,36 кДж/моль. Сам процесс может быть описан моделью равномерно сжимающейся сферы, что позволяет прогнозировать скорость окисления изделия при его эксплуатации в технологическом процессе.

В зависимости от температуры эксплуатации графитированного изделия целесообразно использование разных подходов к повышению окислительной стойкости. Так, до 1000 °С оптимальным является формирование фосфатных и/или боратных стеклообразных покрытий на поверхности электрода. Подобный подход был успешно реализован на анодах, используемых в элек-

тролизе магния. Использование боратных и фосфатных покрытий в дуговых сталеплавильных печах нецелесообразно из-за их низкой окислительной стойкости в заданных условиях, а также из-за возможности загрязнения расплава. Рядом зарубежных ученых предлагается использование карбидных или совместных оксидных и карбидных покрытий. Однако формирование защитного слоя на основе карбидов является энергетически затратным, что влияет на себестоимость конечного изделия.

Коллектив авторов предлагает технологию формирования защитных покрытий, заключающуюся в образовании защитного оксикарбидного покрытия на поверхности электрода путем нанесения на зеленую заготовку оксидов титана, хрома или кремния или их смесей, равномерно диспергированных в предварительно нагретом пеке. Для снижения затрат процесс формирования защитного покрытия может быть реализован в рамках стандартной технологии изготовления электродов, на этапах пропитки и обжига. Оценка окислительной стойкости образцов графита марки УНР, покрытых по предложенной технологии в лабораторном масштабе, позволяет делать вывод о снижении скорости окисления в 2 раза при 1100 °С.

На текущий момент исследуется взаимодействие графитовой подложки и оксидов при температурах выше 1500 °С.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ВЛИЯНИЕ TiB_2 И ZrB_2 НА СТРУКТУРУ И ПЛОТНОСТЬ
КОМПОЗИЦИОННОЙ B_4C -КЕРАМИКИ**

(✉)

E-mail: surtyrockfox@rambler.ru

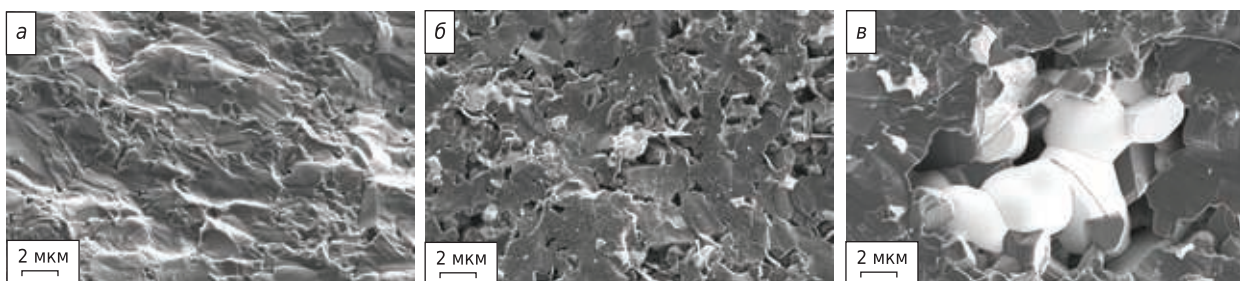
© **Р. П. Хабиров** (✉), **Т. С. Гудыма, Н. Ю. Черкасова, А. В. Масс**

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия

Высокая твердость карбида бора в сочетании с низкой плотностью и химической стойкостью вызывает интерес к керамическим материалам на его основе. Перспективным направлением исследований является разработка подходов к формированию мелкозернистой структуры и снижению пористости B_4C -керамики после спекания, что обеспечивает более высокие механические свойства материала. Формирование мелкозернистой структуры возможно путем контроля температурно-временных параметров спекания, а также введения добавок, препятствующих росту матричных зерен. К таким добавкам относятся соединения TiB_2 и ZrB_2 . Известно, что эти дибориды по сравнению с B_4C способствуют получению мелкозернистой композиционной керамики с более низкой пористостью, с высокими показателями трещиностойкости и прочности на изгиб. По последним данным, в композиции B_4C – TiB_2 удастся достичь предела прочно-

сти при изгибе 620 МПа, трещиностойкости 8,7 МПа·м^{1/2}. Добавка ZrB_2 позволяет повысить эти показатели до 520 МПа и 7 МПа·м^{1/2} соответственно. Улучшение механических характеристик связано с измельчением зерен и остановкой роста трещин на частицах упрочняющей составляющей.

Следует отметить, что наиболее распространенным способом изготовления композиционной керамики на основе карбида бора является горячее прессование. При этом в качестве исходных компонентов используются дорогостоящие порошки ZrB_2 и TiB_2 . В то же время в ряде исследований отмечается, что в процессе синтеза диборидов по карбидоборной реакции в присутствии B_4C и углерода формируются частицы ZrB_2 и TiB_2 размерами менее 100 нм, что может оказать благоприятное влияние на структуру спеченного композита. Малый размер частиц диборидов должен



Поверхность разрушения образцов: а — 100 % B_4C ; б — 10 % TiB_2 –90 % B_4C ; в — 10 % ZrB_2 –90 % B_4C

способствовать их равномерному распределению и эффективному сдерживанию роста зерен B_4C в процессе горячего прессования. Таким образом, цель данного исследования — оценка структуры и пористости керамики на основе B_4C с добавками ZrB_2 и TiB_2 , полученной горячим прессованием с предварительным синтезом диборидов.

Экспериментальные образцы были получены горячим прессованием композиционных порошков B_4C – TiB_2 , B_4C – ZrB_2 . Синтез диборидов из исходных реагентов (TiO_2 , ZrO_2 , C) был проведен в индукционной печи при 1650 °C в защитной среде аргона. В результате карбидоборной реакции полностью сформировались дибориды, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Были изготовлены образцы с добавками 10 об. % диборидов и образец сравнения без добавок.

Наблюдаются значительное снижение плотности и рост пористости в керамике с добавками диборидов по сравнению с карбидом бора без добавок. Для анализа причин получения керамики с неудовлетворительными характеристиками были изучены поверхности разрушения образцов на растровом электронном микроскопе (см. рисунок).

Характер излома поверхности карбида бора без добавок транскристаллитный. Не наблюдается большого количества «вырванных» зерен, что свидетельствует о высоком уровне когезионной прочности. Отсутствует значительная внутри- и межзеренная пористость, что подтверждается результатами гидростатического взвешивания.

На поверхности разрушения керамики с 10 об. % TiB_2 зафиксировано значительное количество «вырванных» зерен, что свидетельствует о низком уровне прочности межзеренных связей. Вблизи частиц диборидов наблюдается смена характера разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный. Вероятно, при движении трещины вблизи зерен TiB_2 механические характеристики которых отличаются от свойств матрицы B_4C , происходит изменение направления ее

движения. Это должно сопровождаться уменьшением скорости распространения трещины и положительно сказаться на трещиностойкости керамики. Низкая относительная плотность этого образца связана с большим количеством межзеренных пор в структуре. В образце керамики с добавкой ZrB_2 также наблюдается значительная межзеренная пористость. Кроме того, зафиксированы крупные скопления частиц диборида циркония, что может быть связано с недостаточно тщательным измельчением порошковой смеси на разных этапах изготовления керамики. Аналогичные скопления меньших размеров наблюдались и для TiB_2 в образце с 10 об. % TiB_2 .

Таким образом, по результатам работы показано, что сочетание карбидоборного синтеза диборидов ZrB_2 , TiB_2 и горячего прессования позволяют получить композиционную керамику на основе B_4C без следов исходных реагентов. Низкая плотность образцов с добавками диборидов связана с большим количеством межзеренных пор в структуре, а также с наличием крупных скоплений второй фазы. Скопление частиц диборидов препятствует уплотнению керамики, так как неэффективно реализуется механизм сдерживания роста зерен в процессе спекания. Следовательно, необходимо проводить подбор оптимальных режимов измельчения порошковых смесей и синтеза, которые позволят получить композиционную керамику с низкой пористостью и улучшенными механическими свойствами.

Работа выполнена в соответствии с Федеральным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FSUN-2020-0014 (2019-0931)): «Исследования метастабильных структур, формируемых на поверхностях и границах раздела материалов при экстремальном внешнем воздействии». Исследования проведены на оборудовании ЦКП Структура, механические и физические свойства материалов» НГТУ (№ 13.ЦКП.21.0034, 075-15-2021-698).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: davidovtrans@mail.ru

**СПОСОБ СИНТЕЗА АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ КЕРАМИКИ**

© Д. Т. Н. М. Л. Хазин, д. х. н. Р. А. Апакашев, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉)

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Для обеспечения надежности и долговечности изделий как обычного, так и ответственного назначения требуются материалы, способные длительное время выдерживать жесткие условия эксплуатации. Подобным требованиям потенциально удовлетворяют функциональные металломатричные композиционные материалы, в частности композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов. Диспергирование более твердой фазы в пластичной матрице алюминия позволяет разрабатывать материалы для специализированного применения. Так, свойства алюминиевой матрицы, армированной частицами керамики, определяют перспективность использования соответствующих алюмоматричных композиционных материалов в изделиях триботехнического назначения.

Известны способы получения металломатричных композиционных материалов, дисперсно-армированных функциональными частицами. Наиболее часто используемыми являются твердофазный синтез (методы порошковой металлургии и диффузионной сварки) и жидкофазный метод (полностью или частично расплавленная матрица при получении композита). При этом одной из основных проблем при получении композиционных материалов является достижение равномерного распределения армирующей фазы в металлической матрице. Повышение равномерности распределения наполнителя отражается на эксплуатационных характеристиках. Чем равномернее распределены армирующие частицы, тем стабильнее свойства получаемого композиционного материала.

Введение армирующих частиц в расплав путем замешивания является одним из распространенных жидкофазных методов получения композиционных металломатричных материалов. Для равномерного распределения вводимых в расплав частиц используют

механическое перемешивание. Непосредственно перед охлаждением расплава перемешивание отключают. В промежуток времени между отключением перемешивания и затвердеванием расплава происходит всплытие частиц либо под действием гравитационных сил происходит их седиментационное осаждение. Всплытие частиц на поверхность расплава или их осаждение происходит в зависимости от соотношения плотностей расплава и частиц, в результате чего в полученном композиционном материале частицы наполнителя могут распределяться неравномерно.

Авторами разработан способ получения алюмоматричных композиционных материалов, дисперсно-армированных частицами керамики, лишенный отмеченного недостатка метода жидкофазного замешивания дисперсных частиц. При получении алюмоматричных композиционных материалов смешиванием реакционной смеси (из термореагирующих компонентов в виде порошков углерод-, или азот-, или бор-, или кремнийсодержащих соединений и матричного компонента) формование полученной смеси под давлением, помещение сформованных образцов в печь, их нагрев в защитной среде и нагрев сформованных образцов производят в среде алюминиевого расплава. Процесс происходит при температуре, обеспечивающей сохранение жидкофазного состояния алюминиевого расплава после помещения в него сформованных образцов в течение времени, достаточного для плавления порошка алюминия, входящего в состав сформованных образцов.

* * *

Исследования проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения базовой части государственного задания, тема № 0833-2020-0007.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: covs1@yandex.ru

**ВЛИЯНИЕ ВИДА УГЛЕРОДНОЙ КОМПОНЕНТЫ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОДШИПНИКОВ WC-Ni-C**© В. А. Хорев^{1,2} (✉), С. Ю. Курочкин¹, В. И. Румянцев¹, В. Н. Фищев²¹ ООО «Вириал», Санкт-Петербург, Россия² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

Одним из основных факторов, влияющих на безотказность и долговечность машин и механизмов, являются характеристики подшипников, работающих в тяжелых условиях, в том числе при воздействии агрессивных сред. При всех плюсах традиционных твердосплавных материалов подшипники на их основе имеют низкую работоспособность при отсутствии или недостаточности смазки. Для преодоления этого недостатка приме-

няют, в частности, добавку в твердый сплав углеродного компонента, который может играть роль твердой смазки в условиях полужидкостного трения. Свойства углеродных материалов изменяются в широких пределах в зависимости от их макро- и микроструктуры, которая обуславливается многими факторами (исходное сырье, технология производства и т. д.). Цель настоящей работы — сравнить влияние вида углеродной до-

бавки на трибологические свойства материала системы WC–Ni–C.

На предприятии «Вириал» были изготовлены образцы из твердого сплава на основе карбида вольфрама с 20 мас. % никеля с добавками углерода ($2,0 \pm 0,2$) и ($4,0 \pm 0,2$) мас. %, а также контрольные образцы без углеродной компоненты. В качестве углеродных добавок использовали графит малозольный (ГМЗ), графит специальный малозольный (ГСМ), терморасширенный графит (ТРГ) и сажевый пигмент Printex V с $S_{уд} = 80 \div 120$ м²/г. Трибологические испытания проводили на универсальной машине трения УМТ2168 при линейной скорости 4,5 м/с, в воде. Притирка образцов длилась 10 мин при нагрузке 250 Н, далее производили ступенчатое нагружение по 250 Н каждые 3 мин до разрушения образцов или достижения нагрузки 5500 Н. Пары трения составлялись из колец с канавками, нанесенными для подачи смазки к поверхностям трения и отвода продуктов износа, и без канавок. Всего было испытано по 10 пар каждого состава.

Из результатов трибологических испытаний видно (см. таблицу), что введение углеродной добавки в

Углеродная добавка	Коэффициент трения	Удельная нагрузка на пару трения, МПа
Без добавки	0,01 ^{*1}	5,0±1,0
Printex V	(0,01–0,02) ^{*1}	8,5±2,0
ГМЗ	0,01	>13 ^{*2}
ТРГ	0,01	>13 ^{*2}
ГСМ	0,01	>13 ^{*2}

*1 До наступления разрушения.

*2 Разрушения при достижении максимальной нагрузки не произошло.

твердосплавную смесь WC–Ni положительно сказывается на трибологических характеристиках образцов. Наименьшее влияние на свойства оказала добавка сажевого пигмента, к тому же образцы этого состава показали в ходе испытаний наименее стабильный коэффициент трения. Введения графита разного вида увеличило удельную критическую нагрузку при испытании на трение более чем в 2 раза.

* * *

Работа выполнена в рамках плановых научно-исследовательских работ ООО «Вириал».

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ MgO–C-ОГНЕУПОРОВ К ЦИКЛИЧЕСКИМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

© К. Т. Н. Т. В. Ярушина (✉), А. О. Мигашкин, А. А. Платонов, М. А. Ерошин

ООО «Группа «Мagneзит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

На преждевременный износ швов и вертикальное растрескивание футеровки сталеразливочных ковшей существенно влияют термические напряжения, возникающие при резком нагревании, охлаждении футеровки, особенно в условиях инверсии теплового потока (нагрев–охлаждение–нагрев). Изменение температурного поля в ковше можно разложить на периоды: предварительный нагрев, ожидание перед выпуском металла из сталеплавильного агрегата, выпуск металла в ковш и изменение температуры после разлива в межплавочный период. Во время предварительного нагрева сталеразливочного ковша в его футеровке возникают сжимающие напряжения. Они обусловлены расширением изделий, установленных вплотную друг к другу без компенсационных швов. Температура горячей поверхности рабочего слоя футеровки достигает 900 °С и снижается в направлении к кожуху. Чем выше ТКЛР, тем выше сжимающие напряжения и выше вероятность разрушения горячей поверхности уже при первых наливах расплава металла в ковш. После предварительного нагрева общее время транспортирования ковша на позицию приема стали и ожидания выпуска может составлять более 15 мин. В этот период футеровка находится в контакте с окружающей средой и испытывает структурные напряжения из-за термического удара. Продление периода ожидания приводит к повышению термических напряжений в структуре огнеупоров и к механическому растрескиванию. После выпуска металла из

сталеплавильного агрегата сжимающие напряжения в стенах ковша повышаются вследствие быстрого расширения огнеупоров. Чем выше температура расплава металла и короче время заполнения ковша, тем выше градиент температур и возникающие в футеровке напряжения. Во время пребывания жидкого металла в ковше напряжения, возникающие во время выпуска из сталеплавильного агрегата, выравниваются по толщине футеровки, а именно, снижаются на горячей поверхности и повышаются в промежуточных зонах. В период охлаждения после разлива сравнительно быстро наступает момент, после которого температура глубоких слоев рабочего слоя футеровки оказывается выше, чем поверхности изделий. При этом поверхность испытывает растягивающие напряжения, а на боковых гранях огнеупора происходит изгиб. Когда растягивающее напряжение чрезвычайно велико, появляются вертикальные трещины, которые разделяют изделия в вертикальном направлении.

Для повышения срока эксплуатации сталеразливочных ковшей желательно, чтобы возникающие при эксплуатации термические и механические напряжения были минимальны и быстро рассеивались. Такое требование могут обеспечить только огнеупоры с пониженным и контролируемым ТКЛР при циклических температурных колебаниях в диапазоне 900–1500 °С.

Известно, что при увеличении в периклазоуглеродистых огнеупорах доли углеродной составляющей их термостойкость повышается за счет повышения тепло-

проводности и уменьшения термического расширения.

Специалистами Группы Магнезит проведено комплексное исследование углеродсодержащих огнеупоров с содержанием углеродной составляющей от 2 до 20 %, в том числе при циклических температурных колебаниях в диапазоне 900–1500 °С. Установлено, что независимо от количества введенного в массу графита в процессе испытания при циклических температурных нагружениях в диапазоне 900–1500 °С относительное удлинение образцов снижается, а после завершения испытания периклазоуглеродистые огнеупоры деформируются. Так, при содержании графита 10 % общая деформация образца после трех циклов испытания составила –0,46 % (см. таблицу, вариант О). Для минимизации этого показателя в состав шихты вводили специальные добавки А, В, С и D. Изделия с добавкой А, хотя и обнаружили минимальное расширение при 1500 °С, при последующих температурных нагружениях значительно и закономерно увеличились в размерах. По сравнению с исходным состоянием размеры образца после завершения эксперимента увеличились на 0,18 %. Изделия с добавкой В обнаружили значительное расширение при 1500 °С и незначительный рост при повторных нагревах. Общая деформация образца после завершения эксперимента составила +0,20 %. Добавка С повлияла на способность к релак-

Показатель	Вариант				
	О	А	В	С	Д
Относительное удлинение при 1500 °С, %:	1,52	1,44	1,89	1,65	1,64
цикл 1-й	1,47	1,87	1,90	1,70	1,64
цикл 2-й	1,43	1,89	1,91	1,73	1,64
цикл 3-й	1,41	1,92	1,92	1,74	1,64
Общая деформация после завершения эксперимента, %	–0,46	+0,18	+0,20	–0,15	0,00

сации напряжений только после 2-го цикла; при этом величина деформации составила –0,15 % (см. таблицу). Максимальной способностью к релаксации напряжений в горячем состоянии характеризовались изделия с добавкой D; после завершения эксперимента этот образец не деформировался.

В настоящее время проводятся опытно-промышленные испытания периклазоуглеродистых изделий с добавкой D в сталеразливочных ковшах одного из металлургических предприятий. В процессе эксплуатации отмечены равномерный износ огнеупоров, отсутствие сколов и вертикальных трещин в футеровке, а также высокая степень устойчивости огнеупоров и швов кладки к размыванию.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ОГНЕУПОРЫ ГРУППЫ МАГНЕЗИТ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ — ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛИДНЫЕ ИЗДЕЛИЯ С ФРАГМЕНТИРОВАННОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

© К. Т. Н. Т. В. Ярушина (✉), А. А. Платонов, М. А. Ерошин, А. О. Мигашкин
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

С точки зрения эксплуатационной надежности механическая прочность периклазошпинелидных огнеупоров относится к наиболее важным показателям. При повышении температуры прочность огнеупоров меняется. Это связано со сложными изменениями в их микроструктуре, обусловленными обратимыми процессами вторичного минералообразования шпинелидов и твердых растворов, сопровождающимися изменениями удельного объема фаз. При разогреве до 600 °С отмечается увеличение прочности структуры, в диапазоне 600–800 °С при развитии процессов вторичного шпинелеобразования и разрыхления структуры прочность снижается. При дальнейшем нагревании до 1300 °С прочность структуры вновь возрастает из-за увеличения количества контактов высокоогнеупорных фаз с формированием жесткого каркаса. Выше 1300 °С прочность стремительно уменьшается вследствие образования в изделиях расплава. При циклических колебаниях температуры в режиме нагрев-охлаждение в микроструктуре огнеупоров возникают разрушающие внутренние напряжения, которые могут быть обусловлены как объемными изменениями идентичных фаз в зонах градиента температур, так и неравномерными изменениями объема сопредельных фаз из-за различия их ТКЛР. При разогреве изделий с высокой

скоростью подъема температуры наружные слои испытывают сжатие, а внутренние — растяжение. При величине растягивающих напряжений, превышающих предел прочности, внутри изделий возникают трещины, приводящие к сколам. При охлаждении растягивающие напряжения возникают на поверхности изделий с образованием наружных трещин, не приводящих, как правило, к сколам.

Следовательно, снизить вероятность образования сколов можно путем увеличения термочувствительности структуры, а также создания фрагментированной микроструктуры, препятствующей зарождению трещин. Анализ ряда факторов и моделирование процесса методом конечных элементов показали, что при воздействии на плотную футеровку из шлифованных изделий знакопеременных температур (когда температура рабочей поверхности варьируется от 1650–1700 °С во время обработки металла до 800–900 °С в межплавочный период) возникают увеличенные термомеханические нагрузки, провоцирующие локальное пластическое разрушение. Одним из нескольких способов минимизации тепловых напряжений в футеровке в течение первого цикла эксплуатации является равномерный подогрев футеровки до более высоких температур, сокращение времени между

подогревом футеровки и первой плавкой, уменьшение межплавочных периодов, а также применение огнеупоров с пониженной теплопроводностью и ТКЛР. Кроме того, огнеупоры должны характеризоваться повышенной прочностью при сжатии и изгибе в диапазоне до 300–400 °С и пониженной долей проницаемых для расплава шлака пор.

Периклазошпинелидные огнеупоры марки ХПП-1 Группы Магнезит с 2008 г. отлично зарекомендовали себя при службе в футеровке патрубков и камер циркуляционных вакууматоров. По эксплуатационной стойкости изделия не уступают огнеупорам ведущих зарубежных производителей. Технология пропитки изделий растворами солей магния и алюминия позволяет существенно улучшить прочностные свойства и минимизировать тем самым растрескивание изделий на стадии разогрева. Кроме того, снижение доли проницаемых пор препятствует проникновению шлака вглубь микроструктуры и взаимодействию шлаковых фаз с матрицей огнеупора с образованием жидких алюминатов кальция или твердых типа шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$ и двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2$.

Для еще большего повышения эксплуатационной надежности патрубков установок вакуумирования стали специалистами Группы Магнезит разработаны огнеупоры нового поколения — периклазошпинелидные изделия марки ХПП-4 с фрагментированной структурой, устойчивой к зарождению и распространению трещин. Новые огнеупоры характеризуются пониженной теплопроводностью — 2,59 Вт/(м·К) при

1000 °С, низким ТКЛР, пониженной открытой пористостью и высокой прочностью при сжатии. Огнеупоры прошли стадию промышленных испытаний. Результаты микроскопических исследований образцов после службы показали, что характер их износа существенно изменился. Установлено, что за время испытания в холодной зоне сформировалась весьма плотная структура с хорошей керамической связью компонентов шихты, а мощность зоны пропитки силикатами не превышает 50 мм. Связь между компонентами в этой зоне осуществляется преимущественно посредством вторичных силикатов. Поры в основном тупиковые, реже закрытые, общая пористость в этой зоне 10–12 %. Трещины в холодной зоне и в зоне пропитки силикатами отсутствуют. Мощность рабочей зоны, в которой наблюдается полное перерождение структуры огнеупора, крайне невелика и составляет от 1 до 15 мм; при этом она характеризуется интенсивным насыщением вторичными компонентами шлакового расплава по поровому пространству. Микроструктура рабочей зоны плотная, общей пористостью 5–7 %, микротрещиноватая. Трещины множественные, извилистые и не заполнены вторичными компонентами шлака. Это позволяет предположить, что они образовались в результате термических напряжений при охлаждении футеровки в межэксплуатационный период. Таким образом, исследование подтвердило, что огнеупоры нового поколения в процессе эксплуатации изнашиваются не как обычно — скалыванием, а шелушением при охлаждении.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ ОГНЕУПОРЫ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

© К. т. н. Т. В. Ярушина (✉), А. А. Платонов, М. А. Ерошин, А. О. Мигашкин

ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Для повышения срока эксплуатации сталеразливочных ковшей требуются огнеупоры с высокой эрозионной стойкостью и ТКЛР при циклических температурных колебаниях. Важными критериями эксплуатационной стойкости огнеупоров являются также низкая механическая прочность при высоких температурах, обуславливающая более податливую структуру, и пониженная теплопроводность, минимизирующая потери тепла и падение температуры в ковше в период межплавочных простоев. Для футеровки сталеразливочных ковшей обычно применяют периклазоуглеродистые огнеупоры. Важнейшей составляющей, обеспечивающей эрозионную стойкость огнеупоров, является их углеродная составляющая. Обычно она представлена твердым носителем углерода — чешуйчатым графитом и коксующейся связкой. Графит практически не смачивается жидким металлом и благодаря этому обеспечивает огнеупорам эрозионную стойкость. Но поскольку графит относится к материалам с высокой теплопроводностью, то он увеличивает теплопроводность футеровки. Увеличение количества вводимого в

шихту графита повышает термостойкость изделий, но способствует снижению температуры расплавленного металла и потерь тепла через футеровку. В качестве коксующейся связки обычно используют фенольные смолы — продукт синтетической поликонденсации фенола и формальдегида. При пиролизе фенольные смолы находятся в твердом состоянии и образуют коксовую структуру с высокой твердостью и низкой способностью к поглощению напряжений в процессе службы — так называемый стекловидный углерод. А так как доля фенольной смолы в составе углеродной составляющей довольно велика и может достигать 40 %, то ее влияние на физико-механические свойства огнеупоров после коксования (в частности, на линейное расширение при циклических температурных нагружениях) является определяющим.

Специалисты Группы Магнезит исследовали свойства углеродной составляющей огнеупоров при одинаковом количественном соотношении графит:фенольная смола. В состав жидкой фенольной смолы были введены добавки А и Б, влияющие на ее

кислотное число. Опыт показал, что после коксования при 1000 °С и дальнейшего дилатометрического измерения при скорости нагрева 10 °С/мин до 1500 °С в среде аргона образцы существенно различались по относительному удлинению. Относительное удлинение образцов на смоле в исходном состоянии было максимальным, добавки А и Б позволили снизить удлинение от исходного состояния на 15 и 20 % соответственно. Испытания при циклических температурных нагружениях в диапазоне 900–1500 °С обнаружили еще один эффект от введения добавок в смолу. Если с каждым циклом размеры образцов на смоле в исходном состоянии закономерно увеличивались и амплитуда изменения размеров образцов при охлаждении от 1500 до 900 °С также постепенно возрастала и составляла от –1,00 до –1,03 %, то амплитуда относительного удлинения образцов на смоле с добавкой А оставалась неизменной, а образцов с добавкой Б зако-

номерно снижалась. Амплитуда изменения размеров образцов с добавками А и Б при охлаждении до 900 °С оставалась на стабильно-постоянном уровне и составляла –0,92 %. Было обнаружено также влияние модифицирования смолы на другие физико-технические свойства изделий после коксования при 1000 °С. Таким образом, меняя вещественный состав углеродной составляющей, можно получить огнеупоры с заданными свойствами для применения в конкретных условиях эксплуатации.

Испытания в службе опытно-промышленной партии периклазоуглеродистых изделий, изготовленных с применением жидкой фенольной смолы, модифицированной добавкой А, показали, что эти огнеупоры более предпочтительны по сравнению с серийными для использования в стенах сталеразливочных ковшей из-за их более высокой термостойкости и, соответственно, малой склонности к растрескиванию.

