

**16–17 МАЯ  
2019 ГОДА**

МОСКВА, НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

# МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ОГНЕУПОРЩИКОВ И МЕТАЛЛУРГОВ



## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

<b>Акишев А. Х., Фоменко С. М., Толендиулы С.</b> Исследование внутрискристаллических напряжений при воздействии неравномерных тепловых нагрузок.....	10
<b>Амежнов А. В.</b> Футеровка сталеразливочного ковша как один из источников неметаллических включений в современных сталях..	10
<b>Борзов А. Н.</b> Моделирование вращающейся печи в программном комплексе Siemens Star CCM+.....	11
<b>Давыдов С. Я.</b> Использование противотеплоизоляционного полотна в стройиндустрии.....	11
<b>Заболотский А. В., Мигашкин А. О., Турчин М. Ю.</b> Моделирование теплового режима футеровки RH-вакууматора.....	12
<b>Кузин В. В., Фёдоров С. Ю., Фёдоров М. Ю.</b> Режущая керамика как ключевой элемент перспективной системы инструментального обеспечения высокоскоростной металлообработки.....	12
<b>Макаров В. Н., Лифанов А. В., Макаров Н. В., Свердлов И. В.</b> Критериальные уравнения локализации пылевых аэрозолей.....	13
<b>Марочкин О. А.</b> Создание элементов из огнеупорных материалов для организации вихревых потоков стали в промежуточных ковшах МНЛЗ.....	14
<b>Перепелицын В. А., Пивинский Ю. Е., Бураков А. Д., Яговцев А. В., Дякин П. В.</b> Легирование и модифицирование — эффективные направления создания новых огнеупоров.....	14
<b>Перепелицын В. А., Яговцев А. В., Колобов А. Ю.</b> Сравнительная материаловедческая оценка свойств огнеупорных минералов (соединений).....	16
<b>Смирнов А. В., Белоглазов И. И., Бойков А. В., Васин А. А., Тарасовский В. П., Рыбальченко В. В., Белов В. В., Локтев М. А., Толоч А. В.</b> Применение компьютерного моделирования методом дискретных элементов для управления структурой огнеупорной керамики.....	17
<b>Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Мануйлова Е. В., Галиханов И. И.</b> Политика совершенствования производства на начальной стадии переработки магнезитовых руд Саткинского и Киргитейского месторождений Группы «Магнезит».....	17
<b>Ярушина Т. В., Ерошин М. А.</b> Комплексный подход Группы «Магнезит» к совершенствованию футеровки сталеразливочных ковшей.....	18

### ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

<b>Ерошин М. А., Пицик О. Н., Беспалова И. Г.</b> Огнеупоры для футеровки леточной зоны ферросплавных печей.....	19
<b>Зубашенко Р. В., Кузин И. Н., Зубашенко В. М.</b> Термостойкие теплоизоляционные изделия, армированные волокном, в футеровке высокотемпературной печи периодического действия.....	19
<b>Коржавин А. Ю., Витовский А. В., Мусевич В. А.</b> Огнеупоры Боровичского комбината огнеупоров для реконструкции воздухонагревателей ЕВРАЗ ЗСМК.....	20
<b>Лисафин А. Б., Богданов Н. Ю., Горбаненко М. А.</b> Новое производство белого электрокорунда в России и перспективные разработки в области оксидных сфероидизированных материалов.....	21
<b>Немсадзе Г. Г., Джоджуа Р. А., Смирнов А. Н., Рябый Д. В., Шарандин К. Н.</b> Современные огнеупоры для быстрой смены стаканов-дозаторов производства компании GIR-ENGINEERING.....	21
<b>Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Валева Л. А., Марченко Д. А.</b> Периклазоуглеродистая торкрет-масса DALGUN P 903.1 для горячего ремонта.....	22
<b>Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Мануйлова Е. В., Коротеев С. А., Симакова О. В.</b> Ремонтные массы на основе периклазового рециклинга.....	22
<b>Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Поспелова Е. И., Кожевникова Е. А.</b> Массы Группы «Магнезит» для рабочего слоя футеровки тепловых и печных агрегатов методом набивки.....	22
<b>Шатохин И. М., Манашева Э. М., Манашев И. Р., Гаврилова Т. О.</b> Разработка композиционных СВС-материалов на основе нитрида кремния для производства огнеупоров повышенной стойкости.....	23

<b>Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А.</b> Хромсодержащие огнеупоры Группы «Магнезит» с усиленной матрицей.....	23
---	----

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

<b>Буньяку Албан.</b> Технология смешивания EIRICH для огнеупорных материалов с улучшенными характеристиками.....	24
<b>Давыдов С. Я.</b> Модернизация контактного теплоутилизатора.....	25
<b>Давыдов С. Я., Амдур А. М., Валиев Н. Г., Апакашев Р. А., Катаев А. В.</b> Исследование агломерационной пыли металлургического завода.....	25
<b>Давыдов С. Я., Валиев Н. Г., Шестаков В. С.</b> Проблемы пылеобразования при грохочении керамзитового щебня и их решение.....	26
<b>Давыдов С. Я., Кожушко Г. Г., Ухов А. Л.</b> Ковшовый элеватор для глубоких карьеров.....	26
<b>Давыдов С. Я., Михалицин А. А., Михалицина О. В., Катаев А. В.</b> Пневматическая система очистки автоклавов для выращивания синтетического кварца.....	27
<b>Макаров В. Н., Давыдов С. Я., Макаров Н. В., Матеров А. Ю.</b> Гидровихревой стратификатор Вентури для улавливания наночастиц.....	28

### НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

<b>Ахоунто Ф., Вайссенбахер М., Тузо Б., Детуф С.</b> Сравнение термомеханических свойств огнеупоров на основе андалузита и огнеупоров на основе бокситов и спеченного муллита.....	28
<b>Абызов В. А., Посаднова Н. Е.</b> Дисперсные промышленные отходы как наполнитель для фосфатных жаростойких ячеистых бетонов.....	29
<b>Абызов В. А., Посаднова Н. Е.</b> Жаростойкий фосфатный ячеистый бетон на основе алюмосиликатных промышленных отходов.....	30
<b>Абызов В. А., Черногорлов С. Н.</b> Глиноземистые вяжущие, модифицированные добавками шлака ферротитана и суперпластификаторами на основе эфиров поликарбоксилатов.....	30
<b>Бабкина Л. А., Савина Л. К., Щербак Л. М., Тинигин А. С.</b> Муллитокорундовая бетонная смесь с кварцесодержащей добавкой.....	31
<b>Баранова Т. Ф., Петерс Н. Н., Полянский С. И., Михайлов В. А., Горбаненко М. А.</b> Керамические оболочковые формы для литья деталей из жаропрочных никелевых сплавов.....	31
<b>Бардин Н. Г., Кошелев Ю. И., Швецов А. А., Кузнецов А. В., Макаров Н. А.</b> SiC-Si-покрытия с добавками тугоплавких боридов ZrB <sub>2</sub> и HfB <sub>2</sub> для защиты углерод-углеродных композиционных материалов от окисления.....	32
<b>Белогурова О. А., Саварина М. А., Шарай Т. В.</b> Неформованный материал из техногенных отходов Ковдорского ГОКа.....	33
<b>Беляков А. В., Церман С. И.</b> Применение алмазного инструмента со структурированным рабочим слоем для сверления огнеупоров.....	34
<b>Гудовских П. С., Вохмаер Кр., Парр Кр., Цеписдин М., Тузо Б.</b> Заполнители для огнеупорных бетонов на основе алюминатов кальция и магния.....	34
<b>Дороганов В. А., Дороганов Е. А., Гавшина О. В.</b> Огнеупорные материалы в системе Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> на основе искусственных керамических вяжущих.....	35
<b>Дорофеев Г. А., Куземко Р. Д., Синельников В. О., Аль-Хабуби А. М. К.</b> Факторы, влияющие на заглубление сверхзвуковой газопорошковой нерасчетной струи в шлаковый расплав.....	36
<b>Зайцев С. В., Дороганов Е. А., Дороганов В. А.</b> Карбидкремниевые материалы на основе искусственных керамических вяжущих.....	36
<b>Зданычус П., Антонович В., Щерба Я., Стонис Р., Борис Р.</b> Исследование жаростойкого шамотного бетона со стойким к щелочным соединениям защитным слоем.....	37
<b>Зубашенко Р. В., Бувайлик Н. В., Новиков А. И.</b> Оптимизация режима сушки и обжига пористых волокнисто-армированных высокоглиноземистых изделий.....	37

<b>Зубашенко Р. В., Кузин В. И.</b> Корундовые теплоизоляционные изделия и пористый наполнитель корундового состава на основе гидравлического вяжущего.....38	<b>Примаченко В. В., Шулик И. Г., Гальченко Т. Г.</b> Низкоцементный корундовый хромосодержащий бетон для службы в реакторах производства технического углерода.....51
<b>Зубашенко Р. В., Павлюшин М. А.</b> Вибропрессование алюмосиликатных волокнисто-армированных пористых изделий.....38	<b>Рева В. П., Ягофаров В. Ю., Назаренко А. А., Титова В. А.</b> Механохимический синтез карбида гафния с применением углерода из возобновляемого растительного сырья.....52
<b>Игнатова А. М., Юдин М. В., Игнатов М. Н.</b> Физико-химические закономерности получения литых слюдокристаллических материалов на основе фторфлогопита для футеровки магниевых электролизеров.....39	<b>Серов Г. В., Земцова Ю. С., Тихонов С. М., Комиссаров А. А., Кузнецов Д. В.</b> Модифицирование неметаллических включений в низколегированной стали.....52
<b>Кардашова Г. Д., Сафаралиев Г. К.</b> Влияние некоторых технологических параметров электроимпульсного плазменного спекания на динамику уплотнения керамики на основе SiC–AlN.....39	<b>Соков В. Н.</b> Энтропия самоуплотняющихся масс.....53
<b>Кашеев И. Д., Глызина А. Э., Иштуганов И. Р., Ивачева Н. Д., Павлова И. А.</b> Теплоизолирующие смеси на основе диатомита Ильинского месторождения.....40	<b>Соколов В. А., Гаспарян М. Д.</b> Получение плавящихся гранулированных цирконийсодержащих материалов.....54
<b>Козлов В. В.</b> Вспененная корундовая керамика.....41	<b>Солдатов А. И., Боровик С. И.</b> Особенности адсорбционного взаимодействия фенола с поверхностью углеродного материала.....55
<b>Красный Б. Л., Иконников К. И., Серебрянский Д. А., Варгания М. А., Родимов О. И.</b> Керамические фильтры для очистки отходящих горячих газов металлургических агрегатов.....41	<b>Суворов С. А., Козлов В. В., Арбузова Н. В.</b> Возможность регулятивного влияния на изменение свойств огнеупоров.....56
<b>Кузин В. В., Фёдоров М. Ю., Фёдоров С. Ю.</b> Технология лазерного наноструктурирования поверхностного слоя на изделиях из высокоплотной керамики.....42	<b>Суворов С. А., Козлов В. В., Арбузова Н. В.</b> Обобщенная характеристика фазообразования и свойств материалов на основе системы $Al_2O_3$ –MgO–C–B–Al–O.....56
<b>Локтионов В. А., Дороганов Е. А., Дороганов В. А.</b> Модифицированные кварцевые системы и композиты на их основе.....42	<b>Суворов С. А., Козлов В. В., Иванов А. В., Погодина К. С.</b> Модификация шлаков внепечной обработки стали для снижения коррозии футеровки и формирования фаз, являющихся компонентами вяжущих систем.....57
<b>Лукин Е. С., Попова Н. А., Модин С. М., Санникова С. Н., Золотарев А. А., Гладков Д. С.</b> Керамические материалы для службы в экстремальных условиях.....43	<b>Суворов Д. С., Хайдаров Б. Б., Лысов Д. В., Жукова П. А., Казаков В. И., Горчаков В. В., Кузнецов Д. В.</b> Наномодифицирование огнеупорных материалов с применением вихревой электромагнитной гомогенизации (ВЭГ).....58
<b>Малкин А. И., Князев Н. С., Кийко В. С., Павлов А. В.</b> Электродинамические свойства керамики ВеО в СВЧ-диапазоне.....44	<b>Сухарев С. В., Заболотский А. В., Котровский П. В., Турчин М. Ю.</b> Влияние конструкции металлоприемного устройства слябовых МНЛЗ на движение металла в промежуточном ковше при отклонении струи от требуемого положения.....58
<b>Марков М. А., Красиков А. В., Беляков А. Н., Быкова А. Д.</b> Функциональные керамические покрытия для изделий морской техники.....45	<b>Чижиков А. П., Бажин П. М., Столин А. М.</b> Получение керамических полых стержней методом СВС-экструзии.....59
<b>Мартыненко В. В., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А., Мишнева Ю. Е.</b> Высокоогнеупорная особоплотная корундовая керамика, изготавливаемая методом шликерного литья.....45	<b>Шабанов Ш. Ш., Кардашова Г. Д.</b> Керамический материал SiC–AlN и его свойства.....59
<b>Мартыненко В. В., Примаченко В. В., Бабкина Л. А., Савина Л. К., Щербак Л. М., Тинигин А. С.</b> Карбидкремниевый огнеупор повышенной прочности на нитридкремнийсодержащей связке.....46	<b>Шабанова Г. Н., Коргодская А. Н.</b> Огнеупорные бетоны на основе специальных цементов.....60
<b>Мартыненко В. В., Примаченко В. В., Бабкина Л. А., Хончик И. В., Никулина Л. Н.</b> Бесцементная бетонная смесь основного состава.....46	<b>Шуклинов А. В., Дмитриевский А. А., Жигачев А. О., Жигачева Д. Г., Дьячек Т. А., Ефремова Н. Ю., Григорьев Г. В., Топчий А. А.</b> Стойкость к термоциклированию циркониевой керамики, упрочненной корундом.....61
<b>Мартыненко В. В., Примаченко В. В., Шулик И. Г., Мишнева Ю. Е., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А.</b> Совершенствование технологии высокоогнеупорных корундооксидцирконийсиликатных изделий для печей производства стекловолокна.....47	<b>Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Мурадян В. Е.</b> Влияние однослойных УНТ на свойства огнеупоров состава MgO–C с ультранизким содержанием углерода: огнеупоры нового поколения.....61
<b>Некрасова О. К., Брыков А. С., Воронков М. Е.</b> Муллитовые огнеупоры с нанодисперсными компонентами и дефлокулянтами.....47	
<b>Непочатов Ю. К., Плетнев П. М., Денисова А. А.</b> Огнеупорный капсель для обжига алюминитридных подложек.....48	
<b>Павлов А. В., Лепешев А. А., Малкин А. И., Кийко В. С.</b> Электропроводная керамика на основе оксида бериллия с добавкой наночастиц $TiO_2$ .....48	
<b>Павловец А. Ю., Кашеев И. Д., Павлова И. А., Митракова В. В.</b> Применение LTCC-композитов для изготовления микроэлектронных устройств.....49	
<b>Перевалов Ю. Ю., Демидович В. Б., Жамбалова С. Ц.</b> Особенности выбора и оптимизации футеровки высокотемпературных нагревательных индукционных печей для графитизации углеродного волокна.....50	
<b>Перепелицын В. А., Земляной К. Г.</b> Влияние флюидов туннельной печи на конституцию обжигаемых изделий при длительной термообработке.....50	
<b>Примаченко В. В., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А., Ткаченко Л. П.</b> Структурообразование корундопериклазовой зернистой массы, содержащей комбинацию диспергирующих добавок на основе полиэтиленгликоля.....51	

#### ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

<b>Аксельрод Л. М., Гартен В.</b> Опыт использования альтернативных схем футеровки сталеразливочных ковшей.....62
<b>Демин Е. Н., Речкалов А. А.</b> Пенокерамическое покрытие для улучшения теплофизических свойств рабочего слоя высокотемпературной теплоизоляции.....63
<b>Демин Е. Н., Савкин В. Г., Речкалов А. А.</b> Пластичные полусухие массы как новый вид неформованных огнеупоров.....63
<b>Клаус С., Бур А., Даттон Дж.</b> Глобальные перспективы применения глиноземошпинельной футеровки в сталеразливочном ковше.....64
<b>Спицин А. С.</b> Объединенная компания Krosaki AMR Refractorios – Refractoria (Испания) — поставщик полного спектра высококлассных огнеупорных материалов для печей производства извести.....64
<b>Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Пицик О. Н., Киселева Е. А.</b> Эксплуатация моноплит Группы «Магнезит» в трехплитных поворотных затворах промежуточных ковшей ММК.....65
<b>Ярушина Т. В., Ерошин М. А., Платонов А. А., Федосов В. Б.</b> Механизм износа периклазошпинелидных огнеупоров в футеровке горизонтального конвертера цветной металлургии.....65

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРИСТРУКТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕРАВНОМЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК**

(✉)

E-mail: adil.akishev@mail.ru

© К. т. н. **А. Х. Акишев** (✉), к. х. н. **С. М. Фоменко**, PhD **С. Толендиулы**

Институт проблем горения, Алматы, Республика Казахстан

Разрушение структуры огнеупорного материала происходит в результате напряжений, возникающих в его межкристаллических и межзеренных связующих. Основными факторами разрушения являются быстрые нагрев и охлаждение футеровки, а также проникновение шлака и расплава металла внутрь огнеупора. Актуальными проблемами являются неравномерное распределение теплового потока по гипотетическим слоям и установление достоверности температурных напряжений, возникающих в комплексных элементах структуры в виде связанных спеченных блоков с кольцевыми микропорами. Особенность структуры огнеупорных материалов — разнородность гранулометрического состава контактирующих кристаллических материалов с включениями или с граничащими порами разных канальной направленности и размеров, а также их фазового состава. Минеральный состав контактирующих частиц кристаллов, образующийся в результате высокотемпературного обжига и диффузионных процессов, формирует в огнеупорном материале подвижные фазы, которые при температурном воздействии становятся более активными.

Воздействие тепловых потоков на огнеупорные материалы и возникающие температурные напряжения при градиенте температур изучали на микро- и макроструктурном уровне. Исследовано воздействие тепловых импульсных потоков в периклазовых огнеупорах на возникновение напряжений в гипотетических слоях структурных элементов, приводящих к образованию микротрещин и разупрочнению огнеупора. Интенсивные тепловые потоки и температурные напряжения способствуют образованию структурных дефектов и разрыву межкристаллических связей.

Результаты электронно-микроскопических исследований структуры огнеупора при воздействии тепловых

импульсных потоков показали ее послонное изменение с появлением микротрещин, связанных с температурными напряжениями и преобразованиями фаз. Установлены особенности изменения температурных напряжений в зависимости от фракционного состава и размера зерен шихты. Показано, что с повышением температуры температурные напряжения уменьшаются синхронно снижению удельного теплового потока. С увеличением размера зерен в шихте температурные напряжения снижаются на 30 %. При изучении тепловых процессов на значительном расстоянии от поверхности нагрева огнеупора наблюдается нарушение синхронности: с понижением удельного теплового потока в этих слоях температурные напряжения возрастают.

Изменение фазового состава в межкристаллических и межзеренных контактах огнеупорного материала накладывается на термонапряжения, возникающие при знакопеременных нагрузках, которые могут снижать напряжения или увеличивать их в зависимости от температуры, являющейся основным фактором появления новых соединений или твердых растворов, которые формируют межфазовые напряженные состояния и, как следствие, изменяют прочность огнеупора. Умеренные термонапряжения и высокие температуры способствуют упрочнению материала в результате залечивания микродефектов. В процессе спекания образовавшиеся в результате диффузии химические соединения и твердые растворы формируют межфазные напряжения с заданными физико-химическими свойствами. Оптимизировать процессы спекания огнеупора с участием твердой и жидкой фаз, с регулируемой способностью материала противостоять термическим напряжениям можно, применяя методы самоспекания, высокотемпературного синтеза и другие новые технологические приемы.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**ФУТЕРОВКА СТАЛРАЗЛИВОЧНОГО КОВША КАК ОДИН ИЗ ИСТОЧНИКОВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ СТАЛЯХ**

(✉)

E-mail: amejnov@mail.ru

© К. т. н. **А. В. Амежнов** (✉)

ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина», Москва, Россия

Рост требований к техническим характеристикам, эксплуатационной надежности изделий нефтегазохимии, транспортных систем, различных конструкций, эксплуатируемых в сложных климатических условиях, обуславливает применение материалов с высокими показателями

прочности, пластичности, хладостойкости, а также стойкости против различных видов коррозии. Вопросам повышения коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных сталей в последнее время уделяется большое внимание. Оптимизация химического состава

ва стали, микроструктуры, а также повышение чистоты стали по определенным типам неметаллических включений позволяют существенно повысить коррозионную стойкость стали и сроки ее безаварийной эксплуатации.

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что с середины 90-х годов прошлого века примерно до конца первого десятилетия XXI века основной причиной ускоренного развития коррозионных процессов сталей в водных средах оказалось повышенное содержание в стали неметаллических включений на основе алюминатов кальция (КАНВ). Начиная с 2005 г. в стали различных производств вместо КАНВ на основе алюминатов кальция были выявлены КАНВ на основе алюминатов магния (алюмомагнезиальной шпинели) с сульфидной составляющей (из сульфида марганца и кальция). Причина этого — изменение состава футеровки сталеразливочного ковша, в котором проводили обработку стали. Именно в этот период все более широкое распространение начали получать

периклазоуглеродистые материалы для шлакового пояса сталеразливочного ковша, что позволило существенно повысить его стойкость. При этом появились новые неметаллические включения, входящие в состав практически всех современных сталей, содержащих магний. Такие неметаллические включения также отрицательно влияют на коррозионную стойкость стали, однако их коррозионная активность ниже, чем активность КАНВ на основе алюминатов кальция.

Дальнейшее развитие металлургических технологий привело к тому, что неметаллические включения на основе алюмомагнезиальной шпинели в современных сталях имеют более сложный состав; оксидная составляющая таких включений может содержать кальций, магний, алюминий и некоторые другие элементы в разных соотношениях. От соотношений содержания таких элементов зависит коррозионная активность включений и, соответственно, коррозионная стойкость стали.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIEMENS STAR CCM+

(✉)

E-mail: aborzov@magnezit.com

© К. т. н. **А. Н. Борзов** (✉)

ООО «Группа «Мagneзит», Санкт-Петербург, Россия

Представлена математическая модель вращающейся печи, реализованная в программном комплексе Siemens Star CCM+. В математической модели реализованы одновременно несколько подмоделей, которые обмениваются данными между собой: движение мультикомпонентного газа (CFD), горение природного газа FGM (Flamelet Generated Manifold Model) и совместный теплообмен твердое – газ СНТ

(Conjugate Heat Transfer). Результатами расчета являются температура нагреваемого материала, футеровки и обечайки печи, а также профиль пламени с концентрациями продуктов горения. Анализ расчетов по математической модели поможет технологам и проектировщикам правильно принимать решения в области управления, контроля и проектирования вращающейся печи.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОЛОТНА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

(✉)

E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉)

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

Отходы производства, содержащие сильнодействующие ядовитые вещества, должны собираться и храниться в изолированных помещениях с противофильтрационным экраном (геомембраны), исключающих загрязнение почвы и грунтовых вод. Прежде всего необходимо организовать основу, которая будет сдерживать песок или щебень от смешивания с природной почвой. Для устранения поглощения природного и складированного материала необходимо использовать геотекстиль — полимерный фильтрующий компонент, который может с легкостью отделить гранулы песка от молекул воды. При этом дренаж будет осуществляться беспрепятственно. Геомембраны успешно применяются в сооружении противофильтрационного экрана для

различных объектов, требующих надежной гидроизоляции. Среди них хранилища огнеупорных сырьевых материалов в полужакрытых складах, шламохранилища, объекты хранения нефтепродуктов и др. Экран из геопленки исключает фильтрацию жидкости и опасных химических компонентов в почву или грунтовые воды. Этот материал уникален тем, что, обеспечивая надежную защиту фундамента от влаги и сырости, он одновременно способствует его качественной вентиляции.

Для геомембран устанавливаются технические требования по следующим основным показателям: по толщине противофильтрационного элемента геомембраны, которая должна составлять не менее 1,0 мм для устранения любых механических повреждений, в том

числе проколов при строительстве и эксплуатации; по прочности противодиффузионного элемента и относительному удлинению при разрыве не менее 30,0 МПа и 600 %; по морозостойкости противодиффузионного элемента не ниже минус 70 °С; по плотности защитных прокладок из геотекстиля для исключения повреждаемости геомембраны при укладке сверху нее покрытий из сборных железобетонных плит или надвижке строительными механизмами защитного слоя грунта, которая должна приниматься не менее 300 г/м<sup>2</sup>.

Разработанное устройство с противодиффузионным полотном обеспечивает полную механизацию укладки водонепроницаемого полотна как при размотке рулона, так и при работе с противоположным краем полотна (заявка на изобретение 2018122731. Способ создания водонепроницаемого экрана / Давыдов С. Я., Валиев Н. Г., Гревцев Н. В., Здоровец И. Л., Фоминых

А. В., Белов В. А.). Устройство может быть использовано в виде водонепроницаемого экрана при рекультивации бесхозного хвостохранилища (<https://vecherka.su/articles/news/132071/>). В настоящее время хвостохранилище промышленных отходов до сих пор остается постоянным источником загрязнения атмосферного воздуха, почв и водных объектов. Ветер поднимает с его поверхности пыль; хвостохранилище размывает дождевые и талые воды. Предполагается выровнять поверхность хвостохранилища, нарастить и укрепить дамбу и сделать водонепроницаемый экран из нескольких слоев суглинков. Авторы разработки предлагают выполнить водонепроницаемый экран в виде геомембраны, которая представляет собой пленочный материал, изготовленный из синтетических полимеров; сверху будет уложен плодородный слой почвы.

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ



E-mail:

azabolotskiy@magnezit.com

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ФУТЕРОВКИ RH-ВАКУУМАТОРА

© К. т. н. **А. В. Заболотский**<sup>1</sup> (✉), **А. О. Мигашкин**<sup>2</sup>, к. т. н. **М. Ю. Турчин**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Термоудар традиционно является одной из важнейших причин разрушения огнеупорной керамики в процессе службы и преждевременного выхода из строя футеровки теплового агрегата. Причиной термоудара является перепад температуры внутри футеровки, причем из-за циклического характера работы оборудования не только по толщине футеровки, но и по ее рабочей поверхности. Это приводит к появлению разнонаправленных термомеханических нагрузок. В частности, футеровка циркуляционного вакууматора (RH-процесс) подвергается термическому воздействию пламени (при предварительном нагреве и подогреве во время межплавочных простоев), а также нагреву от металлического расплава и разогретого инертного газа во время обработки металла. При этом перепад температуры по поверхности футеровки в отдельных случаях может превышать 1000 град. Такие условия эксплуатации приводят к появлению трещин и разрушению огнеупоров. Возможности непосредственного инструментального контроля температуры футеровки во мно-

гих точках одновременно ограничены, поскольку это требует установки целого комплекса измерительной аппаратуры, поэтому актуальны применение расчетных способов определения условий эксплуатации и их верификация по нескольким точкам контроля.

При моделировании условий службы футеровки циркуляционного вакууматора авторы применили программный продукт ANSYS Fluent, предназначенный для моделирования течения жидкостей и газов с возможностью учета теплообмена со стенками оборудования. Выполнен также расчет нагрева инертного газа при его продувке через слой жидкой стали в вакууматоре (алгоритм реализован сотрудниками Группы «Магнезит» с применением Microsoft Excel). Полученный результат (распределение температуры по рабочей поверхности и внутри футеровки) планируется использовать для расчета термомеханических напряжений и выявления наиболее подверженных разрушению зон агрегата для разработки оптимальных схем футеровки циркуляционных вакууматоров.

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ



E-mail:

dr.kuzinvalery@yandex.ru

### РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

© Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**, к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

Эффективность современной металлообработки с применением высокоскоростных станков зависит от уровня инструментального обеспечения. Классическая система инструментального обеспечения ме-

таллообработки, сформированная инструментами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, имеет неоспоримое преимущество — высокую надежность применяемых инструментов. Этот фактор в совокупности

с системами технической диагностики обеспечивает необходимую стабильность производственных процессов. Однако эти инструменты имеют ограничения по допустимой скорости резания, не позволяющие сделать «значимый скачок» в повышении производительности металлообработки.

Позитивно повлиять на эту ситуацию способна новая система инструментального обеспечения, в основе которой будут высокоскоростное резание и инструменты, способные его реализовывать. Этим требованиям удовлетворяет режущая керамика, которая имеет значительно более высокие значения допустимой скорости резания и потенциальные возможности которой в настоящее время недооценены. Однако естественным ограничителем режущей керамики в общей номенклатуре инструментов является узкая область ее эффективного применения из-за нестабильности свойств. Традиционно керамические инструменты успешно использовали при выполнении окончательных технологических операций в условиях жесткой конкуренции со шлифованием.

Эта ситуация кардинально изменилась с появлением нового поколения керамических материалов, имеющих более высокие и стабильные показатели прочности и трещиностойкости. Большое положительное влияние оказала также созданная и реализованная авторами методология проектирования керамических инструментов для заданных условий эксплуатации на основе их термочувствительного расчета. С использованием этих достижений создана гамма инструментов из нитридной керамики, в том числе с наноструктурированным поверхностным слоем и разными функциональными

покрытиями, для расширенного применения. Отличительная особенность этих инструментов — способность реализовывать высокоскоростное резание как на окончательных операциях, так и на предварительных операциях металлообработки. С использованием этих инструментов разработано и внедрено в производство более десяти технологических процессов, позволяющих с высокой производительностью изготавливать высококачественные детали, в том числе из труднообрабатываемых и композиционных материалов.

Внедрение технологии высокоскоростной обработки в областях применения K20–K30 и M05–M20 по стандарту ISO 513:2012 обеспечило повышение производительности до 5 раз. Технология прерывистого точения отливок из чугунов характеризуется повышением производительности до 3 раз при замене инструментов из твердых сплавов. Наибольший эффект в повышении производительности (5,2 раза) зафиксирован при изготовлении канавок в деталях «втулка плунжера» резцами с керамической режущей пластиной оригинальной формы и геометрии.

Накопленный научный потенциал, опыт внедрения новых технологий высокоскоростной металлообработки и постоянно проводимые исследования создают базу для формирования перспективной системы инструментального обеспечения с расширенной долей керамических инструментов.

\*\*\*

*Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6.*

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

(✉)

E-mail: davidovtrans@mail.ru

## КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

© Д. т. н. **В. Н. Макаров, А. В. Лифанов**, к. т. н. **Н. В. Макаров, И. В. Свердлов** (✉)  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Динамика совершенствования техники и технологии пылеподавления в индустрии производства строительных материалов России показывает их недостаточную эффективность в обеспечении санитарно-гигиенических условий, локализации негативных техногенных процессов. Дальнейшее повышение эффективности глубокой переработки минерального сырья, диверсификация производства строительных и огнеупорных материалов существенно ограничены несовершенством способов и средств локализации и ликвидации пылевых аэрозолей.

На базе проведенных исследований с использованием теории Гельмгольца о постоянстве циркуляции скорости по замкнутому контуру, формулы Био – Савара, идентичности диффузии и дисперсии завихренности вязкой несжимаемой жидкости, правила Фурье и П-теоремы определены критерии подобия процесса циркуляционной гетерокоагуляции с использованием

модифицированной математической модели гидровихревого пылеподавления для повышения эффективности локализации взрывов пыли и аэрозолей на горных предприятиях. Установлено, что при устойчивом вращении капель жидкости в условиях гидровихревого пылеподавления изменяются кинематика и динамика процесса взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гетерокоагуляции. Модифицированная математическая модель пылеподавления построена в развитие научной идеи о «присоединенном вихре» с учетом идентичности дисперсии завихренности и диффузии, способствующей разрушению адгезионной оболочки капли жидкости в зоне контакта. Показано, что дифференциальные уравнения, описывающие движение частиц пыли и капель жидкости, в случае гидровихревого инерционного ортокINETического взаимодействия гомогенны уравнениям, описывающим классическую гетерокоагуляцию. Построено критери-

альное уравнение, связывающее между собой критерии и индикаторы подобия в зависимости от угловой скорости вращения капель жидкости.

Полученное критериальное уравнение подтвердило существенное влияние кинематики взаимодействия частиц пыли и капель жидкости в процессе гидровихревой гетерокоагуляции, что обусловлено снижением расклинивающего действия газовой среды в системе твердое – жидкое, т. е. снижение необходимой энергии для полного поглощения за счет увеличения поверхности смачивания. Установлено, что определяющими критериями подобия гидровихревой инерционной

ортокинетической гетерокоагуляции являются критерии Рейнольдса и Стокса. Увеличение эффективного значения этих критериев в условиях гидровихревой коагуляции приводит одновременно к снижению его критического значения, что способствует уменьшению аэродинамического энергетического барьера.

Результаты расчета критического значения «инерционного параметра»  $St_{кр}$  по предложенным математическим моделям и экспериментальным исследованиям в условиях достижения максимальных значений коэффициента эффективности коагуляции  $K_k = 1$  показали достаточную сходимость.

### СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

(✉)

E-mail: m\_a\_r\_chel74@mail.ru

© К. т. н. **О. А. Марочкин** (✉)

ООО «Внедрение новых технологий и оборудования», г. Магнитогорск, Россия

В настоящее время для оптимального прохождения потока жидкой стали в промежуточном ковше разработано множество физических и математических моделей, по которым сконструированы элементы сталепроводки. Особенно широко рассмотрены конструкции элементов из огнеупорных материалов для промежуточного ковша МНЛЗ; представлены различные вариации как применяемых материалов, так и геометрических параметров этих элементов и их влияние на глубину погружения в системе промежуточный ковш – кристаллизатор. Однако большинство моделей направлены на определение тепловых и скоростных параметров для получения равномерного распределения потоков жидкой стали в промежуточный ковш. Для определения влияния вихревых потоков в сталевыпускных отверстиях промежуточного ковша на качество непрерывнолитой заготовки по ранее существующей математической модели была построена новая с учетом параметров сталепроводки для создания отдельных участков с вихревыми потоками.

В качестве примера выбрана модель прохождения жидкой стали для получения сортовой заготовки прямоугольного сечения на пятиручевом промежуточном ковше МНЛЗ. Математический анализ показал, что не на всех ручьях промежуточного ковша возможна стабилизация прохождения потока жидкой стали через сталевыпускные отверстия сталепроводки на участке промежуточный ковш – кристаллизатор, но при этом возможны более равномерные скоростные потоки на выходе из сталепроводки. Это позволит получить эффект планируемого износа погружаемых стаканов и тем самым исключить преждевременный выход из строя одного или нескольких элементов сталепроводки и остановки ручьев сортовых МНЛЗ. Для более глубокой проработки вопроса необходимо проведение испытаний с помощью физической модели по образцам огнеупорных элементов, полученных ранее с помощью математического моделирования.

### ЛЕГИРОВАНИЕ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ — ЭФФЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ОГНЕУПОРОВ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

(✉)

E-mail: pva-vostio@bk.ru

© Д. г.-м. н. **В. А. Перепелицын**<sup>1</sup> (✉), д. т. н. **Ю. Е. Пивинский**<sup>2</sup>, к. т. н. **А. Д. Бураков**<sup>2</sup>, к. т. н. **А. В. Яговцев**<sup>1</sup>, **П. В. Дякин**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Первоуральский динасовый завод», г. Первоуральск Свердловской обл., Россия

<sup>2</sup>ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

Главная цель теоретического и прикладного материаловедения огнеупоров — выявление зависимости функциональных свойств от их минерального (фазового) состава и всех масштабов (порядков) текстуры и структуры. Многолетней собственной практикой (>50 лет) контроля производства и исследования огнеупоров до и после службы установлено, что на многочисленные свойства и технические характери-

стики (>30) этих материалов минеральный состав и особенности строения оказывают различное влияние. Ряд свойств огнеупоров практически не зависит или мало зависит от их макро- и микроструктуры. Другие свойства, наоборот, очень чувствительны даже к небольшим изменениям текстуры и микроструктуры. Наконец, существует третья группа свойств огнеупоров, которые в той или иной степени обусловле-

ны как минеральным составом, так и строением всех масштабов.

На основании системного и корреляционного анализов с использованием имеющихся в технической литературе данных других авторов все физико-химические свойства поликристаллических, поликомпонентных и гетеропористых огнеупоров нами условно объединены в три большие группы: фазочувствительные, структурно-чувствительные и особо чувствительные. В первую группу выделены преимущественно кристаллохимические, термодинамические, химические и физические свойства, величины которых практически не зависят от размеров кристаллов, характеристик кристаллической структуры и пористой текстуры, т. е. являются соответствующими константами. К числу их относятся, например, истинная плотность, температура плавления кристаллических веществ и начала размягчения стекол, ТКЛР, тип плавления (конгруэнтный или инконгруэнтный) и др. Кроме того, фазочувствительные свойства являются диагностическими, на основании определения которых осуществляется идентификация веществ при разных анализах огнеупоров. Для прогнозирования относительной износоустойчивости огнеупорных материалов в службе особое значение имеют предложенные нами ранее величины энергоплотности и термоэнергоплотности минералов (неорганических соединений). Структурно-чувствительные свойства определяются в основном характером кристаллической структуры и пористой текстуры, размером и морфологией частиц исходных порошков, состоянием поверхности и внутренней структуры (дефектности) минеральных индивидов любого вещественного состава.

Наиболее важное значение имеют особо чувствительные свойства (третья функциональная группа), зависящие в различной степени как от вещественного (химико-минерального) состава, так и от реальных текстурно-структурных особенностей огнеупорных материалов и изделий. К этой группе относится большинство физических, физико-химических, химических свойств и технических характеристик огнеупоров, определяющих их эксплуатационную износоустойчивость в тепловых агрегатах у потребителей: теплофизические, термомеханические, высокотемпературная объемная стабильность, устойчивость к воздействию различных корродиентов, термических ударов и других разрушающих воздействий. В эту группу входят также механические, электрофизические и массообъемные свойства.

На основании предлагаемой классификации разработаны три эффективных направления улучшения качества и создания новых поликомпонентных огнеупорных материалов и изделий: фазовое (химико-минеральное), текстурно-структурное и структурно-фазовое.

Известно, что среди материаловедческих наук наиболее высокий теоретический уровень и прикладное значение имеет металловедение, развитие которого начато еще в XIX веке. Для разработки новых сплавов, керметов и других металлосодержащих композиционных материалов почти 200 лет широко используются две технологии: фазовое легирование и структурное модифицирование. Первое направление осуществляется путем введения в металлы и сплавы легирующих добавок в виде элементов (преимущественно переходных металлов: Ti, V, Cr, Ni, Mo, W, Zr, Co и др.). При введении легирующих добавок образуются твердые растворы, существенно улучшающие механические и физико-химические свойства стали и сплавов. Модифицирование — введение в расплавленные металлы модифицирующих веществ, резко корректирующих микроструктуру металлической продукции без существенного изменения фазового состава.

Используя богатый опыт теоретического и прикладного металловедения, авторы предлагают три эффективных технологических направления создания новых огнеупоров: 1) фазовое (минеральное) легирование для улучшения вещественного состава, 2) структурное модифицирование путем регулирования текстуры и структуры (строения) и 3) комплексное (синергетическое) — оптимизация параметров трех групп конституции огнеупора: состава, строения и всех многочисленных физико-химических свойств путем взаимного сочетания фазового легирования и структурного модифицирования.

Ниже приведены примеры эффективного легирования корунда, периклаза и шпинели и других минералов добавками оксидов переходных металлов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и др.). Классическими примерами фазового легирования являются введение стабилизирующих добавок  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  в диоксид циркония, а также микродобавки  $\text{R}_2\text{O}$  (до 0,1 мас. %) в  $\text{SiO}_2$  для синтеза тридимита. Новым направлением совершенствования всех огнеупоров является использование нанотехнологий (структурное модифицирование), реализуемое, в частности, в применении ВКВС — высококонцентрированных вязущих суспензий, разработанное проф. Ю. Е. Пивинским и его школой.

Традиционно в качестве ингибитора собирательной рекристаллизации спеченного корунда используют 1,0–1,5 %  $\text{MgO}$ . Для повышения термостойкости и прочности плавного периклаза необходимо сочетание легирования и модифицирования путем введения в шихту бадделеита или циркона.

Таким образом, на конкретных примерах показана высокая эффективность использования методологии металловедения в огнеупорном и керамическом материаловедении. Легирование и модифицирование — магистральные современные направления совершенствования огнеупоров и керамики.

В научно-производственной деятельности авторам постоянно приходится проводить консультации и давать рекомендации по разработке и выбору износостойчивых огнеупоров для тепловых агрегатов. При этом правильные ответы на возникающие вопросы в производственной практике часто необходимо давать оперативно (иногда почти экспромтом) без проведения сложных и дорогих экспериментальных исследований (НИР). Для решения производственных проблем базовой информацией является не только личный научно-прикладной опыт сотрудников, но и все другие современные источники технической информации: интернет, справочники, монографии, патенты, публикации в отечественных и зарубежных периодических изданиях. Теоретическое и прикладное огнеупорное материаловедение (огнеупороведение) находится сейчас только в начальной стадии своего развития. К сожалению, пока ни в одном российском вузе подготовка специалистов-материаловедов огнеупорного профиля до сих пор не осуществляется, даже учебники по этой научной дисциплине отсутствуют.

Специфической особенностью физико-химической природы современных наиболее стойких огнеупоров является их сложный органоминеральный состав (до 20 и более исходных компонентов в неформованном ассортименте). При этом в конечном итоге в процессе службы износостойчивость определяется как минеральной конституцией, так и условиями эксплуатации футеровки. Сложность решения проблемы прогнозирования ресурса обусловлена тем, что каждый минерал имеет более 30 свойств и технических характеристик, которые непрерывно изменяются в процессе термообработки в зависимости как от многочисленных внутренних фазово-структурных особенностей, так и от параметров эксплуатационной среды (тепловой режим, состав жидких, газообразных и твердых корродиентов, окислительно-восстановительный потенциал реагентов, механические и другие воздействия). Даже с использованием программ современного термодинамического моделирования пока невозможно рассчитать кинетику и термодинамику всех весьма многочисленных фазово-структурных превращений в полиминеральных композициях при

службе огнеупоров в шлаковых средах с переменной газовой средой.

На основании многолетнего опыта нами проведена практическая сравнительная оценка главных служебных свойств огнеупорных минералов (соединений), предопределяющих их поведение в различных условиях эксплуатации. С этой целью сделана сравнительная характеристика 25 тугоплавких соединений в неравновесной системе  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-C}$ . В этой многокомпонентной системе с учетом синтеза карбидов теоретически возможно существование более 30 тугоплавких фаз, включающих различные кристаллохимические типы соединений (в скобках — число минералов): простые оксиды (11), сложные оксиды (8), силикаты (4), карбиды и оксикарбиды (7), элементы (5).

В зависимости от конкретных реальных условий службы все главные функциональные свойства и технические характеристики минералов условно разделены на «положительные», способствующие повышению стойкости, и «отрицательные» (или недостаточные), оказывающие негативное влияние на ресурс футеровки. В число оценочных свойств вошли: теплофизические (температура плавления, огнеупорность, ТКЛР), термомеханические (термостойкость, прочность, температура начала деформации под нагрузкой), устойчивость в восстановительной, окислительной, нейтральной средах и вакууме, атмосферостойкость, шлакоустойчивость в расплавах кислого и основного составов, объемопостоянство, испаряемость, а также экологические характеристики производства и применения.

Разработанная критериальная оценка свойств тугоплавких соединений с учетом экономических и экологических факторов позволяет оперативно прогнозировать относительную износостойчивость огнеупорного соединения (минерала) в реальных условиях эксплуатации в тепловых агрегатах. Методология подтверждена высокой износостойчивостью в службе многих новых видов огнеупорной продукции Первоуральского динасового завода (высокоглиноземистые изделия МКТП-85, корундографитовые, цирконистографитовые, кварцитоуглеродистые изделия, желобные и леточные массы и др.).

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ОГНЕУПОРНОЙ КЕРАМИКИ

(✉)

E-mail:

smimoff-andrey2009@yandex.ru

© К. Т. Н. **А. В. Смирнов**<sup>1</sup> (✉), К. Т. Н. **И. И. Белоглазов**<sup>2</sup>, К. Т. Н. **А. В. Бойков**<sup>2</sup>,  
К. Т. Н. **А. А. Васин**<sup>1</sup>, К. Т. Н. **В. П. Тарасовский**<sup>1</sup>, **В. В. Рыбальченко**<sup>1</sup>, Д. Т. Н. **В. В. Белов**<sup>3</sup>,  
К. Т. Н. **М. А. Локтев**<sup>4</sup>, Д. Т. Н. **А. В. Толок**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», ЦКП «Наукоемкие технологии в машиностроении», Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», кафедра производства строительных изделий и конструкций, г. Тверь, Россия

<sup>4</sup> ФГБУН «Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН», Москва, Россия

Представлены основные подходы к компьютерному моделированию структуры огнеупорной керамики, позволяющие повысить качество и производительность проектирования технологических процессов изготовления огнеупорной керамики с управляемыми характеристиками порового пространства. Рассмотрены и обобщены основные закономерности влияния фракционного состава исходной шихты на особенности формирования структуры формованной заготовки керамики, проанализированы особенности изменения ее структуры в процессе обжига. Обосновано применение метода дискретных элементов для численного моделирования процессов формирования заготовок. Показана принципиальная возможность применения метода Вороного – Делоне для количественного анализа порового

пространства как компьютерных моделей формованных заготовок, так и 3D-реконструкций структуры обожженной керамики, полученной с помощью трехмерной рентгеновской томографии. Предложен комплексный подход к подбору фракционного состава исходной шихты, а также к выбору метода формирования заготовок керамики. Предлагаемый подход основан на методике компьютерного моделирования, включающей автоматизированное определение реологических свойств шихты, моделирование процесса формирования методом дискретных элементов, автоматизированную количественную оценку характеристик порового пространства модели формованной заготовки. Дана оценка возможностей применения этого комплексного подхода к решению практических задач в производстве огнеупоров.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### ПОЛИТИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПЕРЕРАБОТКИ МАГНЕЗИТОВЫХ РУД САТКИНСКОГО И КИРГИТЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ»

(✉)

E-mail: emanulylova@magnezit.com

© К. Т. Н. **М. Ю. Турчин**, **М. А. Ерошин**, **Е. В. Мануйлова** (✉), **И. И. Галиханов**  
ООО «Группа «Мagneзит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

В Группе «Магнезит» успешно реализована технология обогащения магнетитовых руд Саткинского месторождения методом рентгеновской трасмиссии на сепараторах фирмы Steinert Elektromagnetbau GmbH, Германия. В результате освоения этой технологии увеличилась эффективность переработки магнетитовых руд в сравнении с тяжелосредним обогащением, внедрена покусковая сортировка наработанных техногенных отходов. Так, для переработки ранее накопленных и вновь образующихся хвостов обогащения магнетитовой массы проведена опытная работа по обогащению на сепараторах XSS(T)100 и XSS(T)200 хвостов обогащения фракции 150–20 мм (далее — хвосты первой перечистки). Хвосты первой перечистки представляют собой смесь доломита, доломитизированного магнетита и других сопутствующих магнетиту примесных минералов. В результате испытаний при разработанных параметрах обогащения из хвостов первой перечистки был выделен концентрат магнетита марки МП ( $\text{SiO}_2 \sim 1,8\%$ ,  $\text{CaO} \sim 3,2\%$ ), по качеству пригодный для производства товарных порошков с содержанием MgO не

менее 85 %. Выход полученного концентрата составил около 35 % по отношению к хвостовой части.

Эксперимент показал не только технологическую возможность обогащения хвостов первой перечистки, но и ее целесообразность. Поэтому в настоящее время реализуется проект по установке комплекса рентгено-трансмиссионного обогащения непосредственно на площадке одного из карьеров; это позволит перерабатывать магнетитовую руду и техногенные отходы максимально близко к месту их расположения, сокращая количество перевозок полученных хвостов первой и второй перечисток и невостробованных фракций обогащаемой массы. Это наиболее оптимальный способ, который позволяет сэкономить и время, и средства.

Новый производственный объект, по праву называемый мобильным, предусматривает установку (совместно с сепаратором) дробильно-сортировочного комплекса. Наряду с самым главным достоинством этого комплекса — мобильностью он обладает еще рядом преимуществ: исключается подготовка фундаментов, не нужны капитальные отапливаемые корпуса или

конвейерные галереи, размеры производственной площадки небольшие и, следовательно, протяженность коммуникаций гораздо меньше, чем у стационарных аналогов. Другие достоинства нового объекта — способность работать в тяжелых климатических условиях, быстрый ввод в эксплуатацию и возможность его свободного перемещения из карьера в карьер, рас-

положенные в районах месторождений Саткинской группы и Киргитейского (Красноярский край). Реализация проекта позволит увеличить доступный объем минерально-сырьевой базы без капитальных затрат, связанных с разработкой новых месторождений, улучшить экологию города, переработать и впоследствии рекультивировать породные отвалы.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

### КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ» К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

© К. т. н. **Т. В. Ярушина** (✉), **М. А. Ерошин**

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

Группа «Мagneзит», осуществляя комплексную инжиниринговую деятельность, поставляет собственные огнеупоры практически для всех тепловых агрегатов черной металлургии, специализируясь в основном на периклазоуглеродистых, периклазо-алюмоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых материалах. Основная доля в общем объеме поставок огнеупоров приходится на футеровку сталеразливочных ковшей.

Ужесточение условий службы огнеупоров в сталеразливочных ковшах за счет все более широкого внедрения установок внепечной обработки стали обуславливает повышенные требования к футеровочным материалам. Согласно статистике, около трети сталеразливочных ковшей выводятся из эксплуатации при достаточно высокой остаточной толщине футеровки из-за вертикального растрескивания и сколов ее рабочего слоя. Это происходит в результате возникновения напряжений первого рода при циклических температурных перепадах, а также термических напряжений второго рода, обусловленных формированием новых фаз, образующихся при фильтрации шлака в футеровку. Интенсивность трещинообразования первой группы определяется в первую очередь термостойкостью огнеупоров, зависящей от многих характеристик материалов: теплопроводности, ТКЛР, модуля упругости, скорости изменения температуры, размеров изделия и др. Глубина инфильтрации шлака зависит от структурных характеристик огнеупора, а также его коррозионной устойчивости.

Последние разработки исследовательского подразделения Технического управления Группы «Мagneзит» показали, что применение нового комбинированного углеродсодержащего связующего на

основе терморезистивной и термопластичной составляющих в сочетании с повышенной долей углерода в огнеупорах позволяет успешно решить проблемы, возникающие при разогреве футеровки, в том числе экологические. Результаты испытаний в разных условиях подтверждают, что связки нового образца сдерживают выгорание углеродистой составляющей огнеупоров, снижают потребность в использовании дорогостоящих антиоксидантов, предотвращают инфильтрацию расплавов, структурное скалывание и растрескивание рабочего слоя футеровки. Кроме того, при существенном повышении термостойкости огнеупоров за счет увеличения в них доли углерода новое связующее способствует снижению их теплопроводности и ТКЛР. Огнеупоры с применением нового комбинированного связующего и повышенной долей углерода показали высокую эксплуатационную стойкость на контакте со шлаком.

Стремление потребителя огнеупоров к снижению удельных затрат и достижению равномерности износа футеровки по зонам потребовало от инжиниринговой службы новых дизайнерских решений. В последнее время сталеразливочный ковш претерпел существенные изменения: во многих проектах сделан акцент на упрощение дизайна, уменьшение толщины футеровки, применение новых форматов для наиболее полного учета таких параметров технологии, как грузоподъемность транспортных механизмов, размер свободного борта ковшей. Таким образом, комплексный технологический и дизайнерский подход к оптимизации футеровки сталеразливочных ковшей позволяет Группе «Мagneзит» предложить каждому потребителю продукцию, оптимальную по удельным затратам и стойкости.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

**ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ЛЕТОЧНОЙ ЗОНЫ  
ФЕРРОСПЛАВНЫХ ПЕЧЕЙ**(✉)  
E-mail: opitsik@magnezit.com© М. А. Ерошин, О. Н. Пицик (✉), И. Г. Беспалова  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Условия службы огнеупоров леточной зоны ферросплавной печи заключаются в воздействии на них восстановительной среды и металлошлакового расплава. Износ огнеупоров в процессе эксплуатации происходит под воздействием потока расплава и восстановительной газовой среды из-за применения кокса в качестве одного из компонентов шихты. В настоящее время в футеровке леточной зоны электродуговых печей для производства феррохрома применяются огнеупоры зарубежных производителей. Согласно данным каталога, импортные летки представляют собой пропитанные периклазовые огнеупоры с массовой долей MgO ~ 97 %.

В рамках программы сотрудничества ТНК «Казхром» по импортозамещению на Саткинской производственной площадке Группы «Магнезит» разработаны летки периклазового состава в качестве возможного аналога применяемым на предприятии огнеупорам. Летки изготовлены на основе высокочистого плавящего периклаза собственного производства с массовой долей MgO более 97 % и подвергнуты импрегнированию для дополнительного заполнения порового пространства. Изделиям присвоена марка DALMAG 97CI (индекс «I» — пропитанные). Летки марки DALMAG 97CI характеризуются сопоставимыми с зарубежным аналогом физико-химическими показателями свойств; разная открытая пористость леток зависит от типа импрегната (см. таблицу).

Исходя из условий работы агрегата, проведены тесты на определение устойчивости разработанных огнеупоров к воздействию монооксида углерода и шлака феррохромового производства. Испытания на устойчивость к воздействию восстановительной газовой среды проводили по следующей методике: подготовленные образцы изолировали в емкости коксом и термообработывали в нагревательной печи при 1000 °C в течение 3 ч. Визуальная оценка огнеупоров после испытаний показала, что они не претерпели никаких внешних изменений. По данным петрографического анализа, структурные изменения огнеупоров заключались в некотором уплотнении с увеличением

Показатели	DALMAG 97CI (фактические показатели)	Известный аналог
Предел прочности при сжатии, МПа	~130	~110
Открытая пористость, %	~8,0	~3,0
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	3,14	~3,20
Массовая доля, %:		
MgO	97,6	~97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12	~0,2
SiO <sub>2</sub>	0,43	~0,4
CaO	1,24	~1,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46	~0,5

количества прямых связей (на 1 %) и уменьшении размеров пор.

Шлакоустойчивость определяли статическим (тигельным) методом по глубине и площади пропитки образцов корродиентом (шлаком феррохромового производства АО «Казхром») в процессе высокотемпературного обжига при 1850 °C. Применяемый для испытаний корродиент представлен форстеритом, сложным щелочноземельным алюмосиликатом и магнохромпикотитом. Механизм взаимодействия огнеупора с корродиентом заключался в проникновении расплава легкоплавкого сложного алюмосиликата в приконтактный слой огнеупора на глубину 4–9 мм и взаимодействия с периклазом до образования вторичных высокотемпературных фаз — форстерита и АМШ, заполняющих поровую структуру. Сумма открытых пор образца уменьшилась при этом примерно в 2 раза за счет перерождения открытых сообщающихся пор в тупиковые закрытые, что является положительным фактором для защиты структуры огнеупора от проникновения расплава.

По данным лабораторных тестов, периклазовые летки марки DALMAG 97CI демонстрируют высокую степень защиты от воздействия агрессивных компонентов расплава и газовой среды, что указывает на возможность проведения испытаний нового вида продукции в футеровке леточной зоны ферросплавной печи в качестве альтернативы зарубежным аналогам.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

**ТЕРМОСТОЙКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ,  
АРМИРОВАННЫЕ ВОЛОКНОМ, В ФУТЕРОВКЕ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ**(✉)  
E-mail: zroman7777@mail.ru© К. т. н. Р. В. Зубащенко<sup>1</sup> (✉), И. Н. Кузин<sup>2</sup>, В. М. Зубащенко<sup>2</sup><sup>1</sup> ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия<sup>2</sup> ЗАО «Теплохиммонтаж», г. Старый Оскол, Россия

В настоящее время широкое применение получили модульные конструкции футеровки печей периоди-

ческого действия. Футеровка на основе изделий из муллитокремнеземистого стекловолокна характери-

зуется высокой термостойкостью. Однако эти изделия имеют низкие температуру эксплуатации ( $<1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и механическую прочность. Разработанные в ЗАО «ПКФ «НК» изделия, армированные алюмосиликатным волокном, представляют собой обожженный пористый материал с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не менее 63 %, сформованных волокон системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , легковесного заполнителя и неорганической связки. Технология защищена патентом (пат. 2643375 РФ). Изделия отличаются высокой термостойкостью и имеют максимальную температуру применения  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_{\text{сж}} \geq 7,0\text{ МПа}$ ,  $\rho_{\text{каж}} \leq 1,35\text{ г/см}^3$ ).

Для установления эффективности разработанного материала вели наблюдение за периодической печью ЗАО «ПКФ «НК» (проект ЗАО «Теплохиммонтаж»). Максимальная рабочая температура печи  $1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Печь применяли преимущественно для обжига огнеупорной керамики. Изделия использовали в футеровке как стен, так и свода печи (в рабочем слое). Футеровка отработала до капитального ремонта более семи лет. Следует отметить, что отсутствие плотных огнеупоров в конструкции этой периодической печи существенно снижает аккумуляцию тепла кладкой и толщину футеровки. Кроме того, в 2018 г. на предприятии (ЗАО «ПКФ «НК») введены в эксплуатацию еще три периодические печи аналогичной конструкции.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)

E-mail: vmusevich@aobko.ru

### ОГНЕУПОРЫ БОРОВИЧСКОГО КОМБИНАТА ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ЕВРАЗ ЗСМК

© А. Ю. Коржавин, А. В. Витовский, к. т. н. В. А. Мусевич (✉)  
ООО «Торговый дом «БКО», г. Боровичи Новгородской обл., Россия

В ноябре 2015 г. руководство ЕВРАЗ ЗСМК обратилось к Боровичскому комбинату огнеупоров (БКО) с запросом по подбору и производству огнеупоров с заданными требованиями по физико-химическим характеристикам и дизайну изделий (насадочных и стеновых). Изделия предназначались для реконструкции воздухонагревателей (ВН) доменной печи № 2 (ДП) по проекту компании Paul Wurth, которая является одним из мировых лидеров в проектировании и поставке полного спектра технологических решений для черной и цветной металлургии. При реализации нового проекта реконструкции ВН ДП № 2 в сочетании с комплексной поставкой огнеупорных изделий ЕВРАЗ ЗСМК получает следующие преимущества: увеличение нормативного срока эксплуатации от 25 до 30 лет (на 20 %), повышение давления горячего дутья от 0,32 до 0,44 МПа (на 37,5 %) и температуры горячего дутья от 1150 до 1250  $^{\circ}\text{C}$ , а также модернизированные конструкционные элементы для ВН в совокупности с огнеупорными изделиями со специальными термомеханическими свойствами.

После получения запроса на БКО в кратчайшие сроки были подобраны и разработаны все требуемые огнеупорные материалы с заявленными физико-химическими свойствами, в том числе со специальными теплофизическими характеристиками: ползучестью при сжатии, теплопроводностью и термостойкостью. Наличие на комбинате высокотехнологичного оборудования (дробильно-помольного, смесительного, прессового) на всех переделах производства, богатой научно-технической базы, высококвалифицированных кадров позволило разработать необходимую прессовую оснастку для выпуска особосложных изделий по данному проекту, освоить технологию производства огнеупорных материалов с заданными техническими параметрами и обеспечением необходимой точности геометрических размеров. Результат — полное подтверждение возможности производства и осуществления комплексной поставки огнеупорной продукции для реконструкции ВН по проекту и требованиям заказчика. Соответствие фактических характеристик выпускаемых огнеупорных из-

делий требованиям спецификаций и норм обследования футеровки горячего дутья заказчика неоднократно подтверждено результатами тестирования в независимой европейской лаборатории. В ноябре 2017 г. была получена аттестация от компании Paul Wurth на квалификацию предложенных БКО огнеупорных материалов для реконструкции ВН: шамотных, муллитокремнеземистых и высокоглиноземистых стеновых полнотелых, а также муллитокремнеземистых и высокоглиноземистых насадочных. Специалистами Paul Wurth дополнительно были выданы рекомендации по оптимизации технологии выпуска огнеупорной продукции.

В феврале 2018 г. БКО получил заказ на поставку огнеупорной продукции для строительства трех ВН № 7, 6, 5 ДП № 2 ЕВРАЗ ЗСМК. Спецификация выделенных объемов комплексной поставки включает 47 типоразмеров стеновых и насадочных огнеупорных изделий трех марок общим объемом более 1900 т для каждого ВН. С марта 2018 г. боровичские огнеупорщики приступили к выпуску продукции. В процессе производства были проведены три расширенные инспекции специалистов ЕВРАЗ ЗСМК и Paul Wurth для входного контроля огнеупорных изделий и соответствия их требованиям спецификации заказчика. По итогам проведенных инспекций существенных претензий и нареканий к качеству продукции не поступало; отмечена высокая точность геометрических размеров изделий, что особенно важно для облегчения и ускорения проведения монтажных и футеровочных работ в условиях ЕВРАЗ ЗСМК. Поставка огнеупорной продукции для реконструкции ВН № 7 осуществлена в установленные сроки. В марте 2019 г. на ЕВРАЗ ЗСМК завершаются строительно-монтажные работы ВН № 7, а на БКО продолжают выпуск и внутренняя приемка огнеупорной продукции для следующего ВН № 6.

Слаженная совместная деятельность позволила провести успешную реализацию сложного и масштабного проекта, что укрепило взаимодействие БКО с ЕВРАЗ ЗСМК — одним из крупнейших потребителей огнеупорных материалов и многолетним партнером.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)  
E-mail: info@technokeramika.ru

## НОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО БЕЛОГО ЭЛЕКТРОКОРУНДА В РОССИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОКСИДНЫХ СФЕРОИДИЗИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© К. т. н. **А. Б. Лисафин** (✉), к. ф.-м. н. **Н. Ю. Богданов, М. А. Горбаненко**  
ООО «Технокерамика», г. Обнинск Калужской обл., Россия

Основные цели компании «Технокерамика» — производство высококачественных материалов из оксида алюминия, муллита, диоксида циркония, циркона и др. По прошествии многолетней работы компания «Технокерамика» предлагает широкую номенклатуру продукции.

**Электрокорунд белый марки 25А.** Компания предлагает полный цикл производства — от электродуговой плавки глинозема (на производственной площадке в Казахстане) до получения широкой гаммы фракционированных порошков белого электрокорунда марки 25А по стандарту FEPA (F14 - F2000) и тонкомолотых порошков (<0,010, <0,015, <0,02, <0,045 и <0,063 мм), огнеупорные фракции мельче 1 мм, 1–3 мм и др. Возможности производства позволяют удовлетворить широкие запросы потребителя, наличие складского запаса обеспечивает оперативную поставку продукции, качество производимой продукции контролируется на всех этапах производства в лаборатории, оснащенной оборудованием мирового уровня.

**Сферические оксидные порошки.** В рамках создания новых материалов для огнеупорной промышленности освоено производство сферических порошков с размерами частиц от 5 до 300 мкм различных оксидов, таких как оксид алюминия, алюмомагнезиальная шпинель, силикат циркония, муллит, диоксид циркония, стабилизированный иттрием и кальцием, диоксид кремния, оксид алюминия с низким содержанием

щелочных элементов (<0,05 %). Сферические частицы получают путем использования энергии индукционной плазмы. Применение сфероидизированных порошков позволяет улучшить реологические свойства огнеупорных бетонов, уменьшить влагопотребление, повысить плотность упаковки частиц. Ведутся работы по получению сферической алюмомагнезиальной шпинели для нанесения ее на поверхность изложниц, узлов разливочных ковшей и других агрегатов для уменьшения смачиваемости жидкого металла.

**Стабилизированный диоксид циркония.** Активно развивается направление производства стабилизированного  $ZrO_2$ . Освоено производство кальций- (4–6 % по массе) и иттрий- (10 % по массе) стабилизированного диоксида циркония, который используется в производстве узлов МНЛЗ; тиглей для плавки жаропрочных сплавов; для нанесения термобарьерных покрытий на изделия, которые работают при высоких температурах.

Все материалы имеют широкий спектр применения — от общепринятых (для белого электрокорунда 25А) до малоразвитых в нашей стране (сферические оксидные порошки): теплопроводящие компаунды, наполнители в пластмассы, резину и силиконы, герметики, эпоксидные смолы, 3D-печать, керамические фильтры, тормозные диски и фрикционные материалы, диэлектрические материалы, материалы для термобарьерных покрытий, материалы для производства микроэлектроники.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)  
E-mail: dmitriy.ryabyi@gir.ua

## СОВРЕМЕННЫЕ ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ БЫСТРОЙ СМЕНЫ СТАКАНОВ-ДОЗАТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ GIR-ENGINEERING

© **Г. Г. Немсадзе**<sup>1</sup>, **Р. А. Джоджуа**<sup>1</sup>, д. т. н. **А. Н. Смирнов**<sup>2</sup>, **Д. В. Рябий**<sup>2, 3</sup> (✉), **К. Н. Шарандин**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ПАО «ЗНВКИФ» «General Investment Resources», Киев, Украина

<sup>2</sup> Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН, Киев, Украина

<sup>3</sup> Компания GIR-ENGINEERING Ltd, г. Днепр, Украина

Установлено, что максимальное число нарушений компактного характера истечения струи приходится на начало разлива «серии», что обусловлено фактором развития так называемых «стартовых вееров». В ходе разлива серии металла наблюдается монотонное снижение возникающих «вееров», что, предположительно, обусловлено уменьшением эрозии футеровки промежуточного ковша по мере увеличения толщины спеченного слоя футеровки. Неметаллические включения, обнаруживаемые в каналах стаканов-дозаторов, имеют вид относительно рыхлых отслоившихся фрагментов футеровки промежуточного ковша. Результаты химического анализа экзогенных включений показали, что в них преобладают частицы  $MgO$  (~50 %) и  $SiO_2$  (~25 %), а также капли стали.

Для улучшения компактности истечения струи металла в процессе разлива компания производит стаканы-дозаторы систем CNC и MNC с применением высококачественных циркониевых вставок (содержание  $ZrO_2$  не менее 93 %), что, в свою очередь, позволяет снизить взаимодействие калибровочной вставки с продуктами плавки (металл, шлак). Стаканы-дозаторы испытывали на металлургическом предприятии с конвертерным производством, в составе которого имеется высокоскоростная многоручьевая сортовая МНЛЗ. Максимально достигнутая стойкость стаканов-дозаторов в период испытаний составила 10 ч 15 мин. Испытания показали, что применение стаканов-дозаторов производства компании GIR позволяет достичь стабильного процесса разлива в течение длительного периода и снизить вероятность нарушения компактности истечения металла.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

**ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТАЯ ТОРКРЕТ-МАССА DALGUN P 903.1  
ДЛЯ ГОРЯЧЕГО РЕМОНТА**

(✉)

E-mail: dmarchenko@magnezit.com

© К. т. н. **М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин, Л. А. Валеева, Д. А. Марченко** (✉)  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Разработана технология изготовления периклазоуглеродистой торкрет-массы марки DALGUN P 903.1 для горячего ремонта конвертеров, электропечей. В состав массы вводится органическая, химическая и керамическая связка, а также дисперсное термопластичное связующее, обеспечивающее хорошую адгезию массы к футеровке агрегата и образование углеродистого каркаса, который уменьшает смачиваемость массы

металлом и шлаком, что повышает стойкость. На данный момент состав доработан под условия для работы на Магнитогорском металлургическом комбинате. По результатам заключения от ММК зафиксировано мгновенное интенсивное горение массы после начала нанесения. После торкретирования и поворота конвертера на сторону загрузки остаток торкрет-массы составил порядка 90 %.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

**РЕМОНТНЫЕ МАССЫ НА ОСНОВЕ ПЕРИКЛАЗОВОГО РЕЦИКЛИНГА**

(✉)

E-mail:

emanuylova@magnezit.com

© К. т. н. **М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин, Е. В. Мануйлова** (✉), **С. А. Коротеев, О. В. Симакова**  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

В течение последних лет мировой рынок продукции черной металлургии демонстрирует устойчивое развитие. Необходимость сохранения и наращивания объемов производства обуславливает непрерывную разработку материалов, предназначенных для ухода за футеровкой, что выражается в расширении ассортимента масс, в том числе и ремонтных. Специалистами Группы «Магнезит» проведены работы по оптимизации состава и повышению качественных характеристик масс, используемых для горячего ремонта футеровки ДСП.

Футеровка ДСП существенно влияет на химическую чистоту и физико-механические свойства выплавленного металла (пластичность, структуру, прочность, коррозионную стойкость и др.). Оптимизированная масса содержит рециклинговые материалы, обеспечивающие стабильный химический состав готового

продукта, что гарантирует высокое качество выплавленного металла. Еще одно немаловажное свойство, которым должна обладать масса — это плотность упаковки. Комплекс добавок, применяемых в ремонтной массе, позволил достичь положительных служебных характеристик: увеличить адгезию массы к футеровке в процессе проведения горячего ремонта подин и откосов ДСП, достичь ее минимального отскока, увеличить плотность упаковки зерен, снизить пыление и, как следствие, повысить стойкость массы.

Проведенные промышленные испытания массы в условиях Белорусского металлургического завода показали положительные результаты; разработанная масса внедрена в производство. В настоящее время планируется проведение испытаний на других металлургических предприятиях.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

**МАССЫ ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ» ДЛЯ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ  
ТЕПЛОВЫХ И ПЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ МЕТОДОМ НАБИВКИ**

(✉)

E-mail: epospelova@magnezit.com

© К. т. н. **М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин, Е. И. Поспелова** (✉), **Е. А. Кожевникова**  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Набивные массы — неформованный огнеупорный материал, предназначенный для футеровки различных узлов и деталей плавильных и нагревательных агрегатов: электропечей, конвертеров, сталелитейных, промежуточных ковшей и др. Затворение сухой массы водой перед ее применением приводит к некоторым сложностям: чересчур малая влажность снижает скорость изготовления футеровки, излишняя влажность может приводить к образованию усадочных трещин после тер-

мообработки; в зимний период возникают сложности в работе; необходим отдельный участок со смесительным оборудованием. В этой связи в Группе «Магнезит» разработана набивная масса периклазового состава, не требующая увлажнения водой, готовая к применению. Масса морозостойчивая, не склонная к окомкованию в процессе хранения и доставки. Масса обладает всеми необходимыми физико-механическими свойствами, может быть фосфатосодержащей и бесфосфатной.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)  
E-mail: mirney@yandex.ru**РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ  
ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ**© И. М. Шатохин<sup>1</sup>, Э. М. Манашева<sup>2</sup>, к. т. н. И. Р. Манашев<sup>1</sup> (✉), Т. О. Гаврилова<sup>1</sup><sup>1</sup> ООО «Научно-техническая производственная фирма «Эталон», г. Магнитогорск, Россия<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

Нитрид кремния является одним из немногих бескислородных тугоплавких соединений, нашедших широкое применение в промышленности благодаря своим уникальным физико-химическим характеристикам. Как жаропрочный конструкционный материал он используется в деталях поршневых двигателей и турбин; из нитрида кремния делают режущие пластины инструментов для станков-автоматов, коррозионно-стойкие защитные чехлы для термопар, высокотемпературные фильтры для агрессивных жидкостей и т. д. В огнеупорной промышленности нитрид кремния наибольшее применение нашел в качестве связки карбидкремниевых изделий для футеровки алюминиевых электролизеров, коксовых батарей, доменных печей, топочных устройств. Кроме того, нитрид кремния широко применяется в неформованных огнеупорах, в частности в леточных и желобных набивных массах. На сегодняшний день нитрид кремния на ферросилицидной связке ( $\text{FeSi}_3\text{N}_4$ ) регламентируется в составах леточных масс всех ведущих производителей. Причем его концентрация строго зависит от объема домны — для печи большого объема предлагается леточная масса с высоким содержанием  $\text{FeSi}_3\text{N}_4$ .

В настоящее время НТПФ «Эталон» разработана серия композиционных материалов на основе нитрида кремния для производства огнеупоров широкого спектра (см. таблицу). Используя богатый опыт и возможности метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), технологи предприятия разработали нитридкремниевые композиции специализированного назначения, которые изготов-

**Композиционные материалы на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для производства огнеупоров**

Материал	Композиция	Изделие
Нитрид кремния на ферросилицидной связке NITRO-FESIL® TL, NITRO-FESIL® AL	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Fe(Si)}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC-Fe(Si)}$	Леточные массы, набивные желобные массы
Нитрокарбид, Нитрокарбид на ферросилицидной связке REFRASIN	$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC-C}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC-Fe(Si)}$	Карбидкремниевые содержащие огнеупоры
Нитрид кремния, Нитрид кремния с кремнием	$\text{Si}_3\text{N}_4$ , $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$	Углеродсодержащие огнеупоры
Сиалонные композиции на ферросилицидной связке NITRO-FESIL® ALON20	$\text{Si-Al-O-N-Fe(Si)}$	Карбидкремниевые изделия на нитридной связке, бетоны для желобов

ливают на производственной базе НТПФ «Эталон» в специализированных СВС-реакторах при высоких температурах (~2000 °C) и давлении (~10 МПа). Некоторые материалы еще находятся в стадии лабораторных тестов и исследований, ряд композиций уже прошли промышленные испытания и серийно используются отечественными и зарубежными производителями огнеупоров. В частности, упрочняющие добавки NITRO-FESIL® активно экспортируются в Европу и в другие регионы для изготовления пластичных масс для заделки леток доменных печей ведущими производителями (TRB, Calderys, SEEIF ceramic, Seven Refractories и др.).

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)  
E-mail: tyarushina@magnezit.com**ХРОМСОДЕРЖАЩИЕ ОГНЕУПОРЫ ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ»  
С УСИЛЕННОЙ МАТРИЦЕЙ**

© К. т. н. Т. В. Ярушина (✉), к. т. н. М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин

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

В Группе «Магнезит» разработаны хромсодержащие огнеупоры с содержанием оксида хрома от 3 до 26 %, устойчивые в особо жестких условиях эксплуатации благодаря усилению матрицы плавными материалами повышенной чистоты. Изделия изготавливают с применением высокоплотного периклазового клинкера собственного производства с массовой долей  $\text{MgO}$  не менее 95 %. Ассортимент включает изделия марок ПШХП по ТТ 72664728-865-2018, ПХП-4 по ТТ 72664728-544-2013 с изменением № 1, ХПП-2 по ТТ

72664728-211-2009 с изменением № 2 и ХПП-2 по ТТ 72664728-871-2018. В таблице приведены типичные физико-технические показатели огнеупоров.

Введение в матричную часть огнеупоров плавных материалов благоприятно влияет на особенности формирования их микроструктуры и физико-технические показатели. Между тонкомолотыми частицами в процессе высокотемпературного обжига развиваются связи преимущественно через хромшпинелид, а в поровом пространстве образуется достаточно много пор закры-

Показатели	ПХПШ	ПХП-4	ХПТ-2	ХПП-2
Массовая доля, %:				
MgO	80,3	77,6	61,4	55,5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,76	8,70	18,8	22,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,66	3,14	5,32	6,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,15	7,52	11,00	13,23
CaO	1,58	1,50	1,49	0,91
SiO <sub>2</sub>	2,13	1,93	1,95	0,89
Предел прочности, МПа:				
при сжатии	78,8	79,5	76,8	74,1
при изгибе (1200 °С)	8,8	16,4	17,2	12,2
Открытая пористость, %	14,4	15,7	14,1	13,7
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	3,06	3,10	3,29	3,33
Температура начала размягчения под нагрузкой, °С:				
по ИСО 1893–89 (T <sub>0,5</sub> )	1693	>1700	>1700	>1700
по ГОСТ 4070–2000	1670	1640	1635	1680
Термостойкость (950 °С – воздух), тепло-смены	>30	>30	>30	>30
Расчетный размер эффективных пор r <sub>ср</sub> , мкм	5,42	6,62	6,83	6,49
Газопроницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,212	0,298	0,315	0,289
Теплопроводность, Вт/(м·К), при:				
400 °С	4,71	6,15	6,29	4,82
800 °С	3,86	4,51	4,87	3,70
1300 °С	3,23	3,36	3,45	2,96
ТКЛР (20–1500 °С), 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	12,90	13,14	13,41	11,59

того изолированного типа, что положительно влияет на коррозионную устойчивость изделий при службе в шлаковых расплавах.

Изделия предназначены для футеровки тепловых агрегатов преимущественно цветной металлургии, но мо-

гут быть востребованы и в других отраслях промышленности, например в цементной (в этом случае от изделий требуется высокая устойчивость к термомеханическим нагрузкам и малый размер канальных пор, пронизываемых для расплава компонентов цементного клинкера).

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

### ТЕХНОЛОГИЯ СМЕШИВАНИЯ EIRICH ДЛЯ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

(✉)

E-mail: alexey.kolesov@eirich.ru

© Албан Буньяку (✉)

Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG, г. Хардхайм, Германия

Более 100 лет EIRICH играет активную роль в развитии технологий промышленного смешивания. Огнеупорная промышленность в течение многих десятилетий также использует эту технологию смешивания материалов. В смесителях EIRICH получают прессовочные, набивные, пластичные массы (в том числе леточные), прессовочные массы для изготовления изделий на карбоксильнокатионитовой связке (с углеродистой смолой) и огнеупорных изделий (с температурой смешивания до 180 °С). Гранулят для изостатического прессования также производят в смесителях EIRICH. При использовании летучих органических растворителей смешивание / гранулирование происходит в среде инертного газа. Большие преимущества у технологии смешивания EIRICH для изготовления неформованных изделий, особенно сухих смесей. Производители огнеупорной продукции заменили кольцевые и планетарные смесители на смесители EIRICH; при этом для смешивания требуется до 15 % меньше воды. Во многих случаях

плотность сырья увеличивается в первом десятичном порядке, в результате чего уменьшается открытая пористость и повышается прочность готовых изделий.

Смесители EIRICH показывают оптимальные результаты при работе со всеми типами смесей. В настоящее время в огнеупорной промышленности используют смесители вместимостью от 75 до 3000 л, а также лабораторные смесители (1, 5, 10 и 40 л). Высокоемкие смесители до 12000 л, работающие в других отраслях, в огнеупорной промышленности до настоящего момента не использовались.

Многие потребители проводят исследования оригинальных материалов в испытательном центре EIRICH. Обычно они начинают с объема смесителя 75 л. Для более детального исследования могут быть подготовлены смеси до 400 л. Во многих компаниях до сих пор используют смесители с горизонтальным резервуаром, которые устанавливали с 1960 г. Сегодня доступны смесители с наклонными резервуарами.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНТАКТНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА

(✉)  
E-mail: davidovtrans@yandex.ru

© Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉)

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

В роли теплообменных аппаратов — утилизаторов теплоты уходящих газов традиционно применяют контактные поверхностные теплообменники — экономайзеры. Проблема заключается в необходимости оснащения их повышенной площадью теплообмена и, как следствие, большими металлоемкостью и аэродинамическим сопротивлением. Как известно, теплообменник контактного типа различных компоновок — это часть котельной установки, в которой вода нагревается за счет прямого контакта холодной воды и горячих уходящих дымовых газов. Воду, как правило, используют для систем горячего водоснабжения. Температура дымовых газов после котельных установок порядка 130–190 °С. Дымовые газы после различного рода печей могут иметь значительно более высокую температуру (до 300–500 °С и выше). В этом случае утилизация теплоты (и охлаждение газов) просто необходима. Воду в контактном теплообменнике нагревают до возможно более высокой температуры (55–65 °С), близкой к температуре мокрого термометра. Температуру уходящих газов на выходе теплообменника для расчетов принимают равной 35–40 °С. Как известно, дымовые газы как источник вторичных энергоресурсов в полной мере характеризуют три показателя — расход, температура и влагосодержание.

Для возможности использования температуры уходящих дымовых газов и исключения выброса нагретого хладагента предложена конструкция контактного

теплоутилизатора с тепловодом для сообщения полостей охладителя с оросителем посредством их патрубков (пат. 147163 РФ. Контактный теплоутилизатор с каплеуловителем / Давыдов С. Я., Голешов А. В., Лукичев И. В., Замураев А. Е., Бюл. № 30). Предложенный теплоутилизатор с тепловодом позволяет уменьшить образование куржака и обледенения на выходе патрубков и в конечном итоге снизить трудозатраты на очистку и увеличить срок их службы.

Высокая эффективность улавливания водяных паров и надежность в работе аппарата обеспечивается простыми в изготовлении и использовании устройствами. Происходит очистка тонкодисперсных туманов до регулируемой остаточной концентрации. Обеспечивается охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удается сконденсировать максимально возможную часть водяных паров, содержащихся в газах, и использовать выделяющуюся при конденсации скрытую теплоту. Предложенные конструкции контактного теплоутилизатора могут быть применены для утилизации дымовых газов, возникающих, например, в мартеновских, стекловаренных печах, в вагранках при прокаливании, например, кирпича, керамики, при нагреве слитков перед прокаткой и др. Применение продуктов сгорания природного газа в тепличном хозяйстве промышленных предприятий позволит решить одновременно две задачи — повысить урожайность и экономичность работы теплоагрегатов.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

(✉)  
E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. т. н. С. Я. Давыдов<sup>1</sup> (✉), Д. т. н. А. М. Амдур<sup>1</sup>, Д. т. н. Н. Г. Валиев<sup>1</sup>,  
Д. т. н. Р. А. Апакашев<sup>1</sup>, А. В. Катаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Основными источниками вредных выбросов на металлургических комбинатах являются аглофабрики. В 2016 г. проведена внеплановая проверка Надеждинского металлургического завода, касающаяся устранения санитарно-эпидемиологических нарушений, выявленных на заводе. После плановой проверки устранены выявленные на заводе нарушения: проведены реконструкция агломерационного производства с установкой системы газоочистки, а также техническое перевооружение агломашины № 2 с установкой системы аспирации. Для обеспечения экологических требований (в связи с более интенсивным процессом обработки аглоспека) перепроектирована система удаления запыленного воздуха в аглокорпусе № 2. Аспирационная установка позволит удалять пыль при дроблении и грохочении агломерата. Вся пыль, уловленная при обработ-

ке агломерата, будет утилизироваться обратно в шихту, т. е. производство предусмотрено безотходным.

Для исследований были представлены две пробы пыли, отобранные в агломерационном цехе завода. Маркировка проб пыли: № 1, отметка 12,3 м; № 2, отметка 4,2 м. Результаты опытов химического анализа пробы пыли № 1, мас. %: Fe<sub>общ</sub> 36,20, FeO 10,89, Fe<sub>мет</sub> 1,02, CaO 16,32, SiO<sub>2</sub> 11,92, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,93, MgO 1,61, C 4,63, Δm<sub>прк</sub> 7,28; пробы пыли № 2: Fe<sub>общ</sub> 37,09, FeO 12,16, Fe<sub>мет</sub> 0,76, CaO 15,35, SiO<sub>2</sub> 11,45, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,26, MgO 1,31, C 5,47, Δm<sub>прк</sub> 7,33. Дополнительный анализ проб для определения содержания фракций мельче 0,04 мм проводили на лазерном анализаторе размеров частиц SALD-2201 (Shimadzu). Эти результаты достаточно близки к результатам ситового анализа. Средняя крупность частиц составляет для пробы № 1 37,03 мкм, для пробы № 2 21,77 мкм.

Для обеспечения экологических требований и в связи с более интенсивным процессом обработки аглоспека для конкретных заводских условий работы Надеждинского металлургического завода предложено использовать колосниковый грохот для пылеобразующих материалов (заявка 2018136041. Колосниковый грохот для пылеобразующих материалов / Давыдов С. Я.,

Абдулкаримов М. К., Лагунова Ю. А., Шестаков В. С.). Удаление пылевых частиц в непосредственной близости от рабочих органов, образующих пыль, уменьшает объем удаляемого воздуха, что отражается на энергопотреблении. Предлагаемое устройство позволяет значительно повысить эффективность улавливания пылевых частиц.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

### ПРОБЛЕМЫ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГРОХОЧЕНИИ КЕРАМЗИТОВОГО ЩЕБНЯ И ИХ РЕШЕНИЕ

(✉)

E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. т. н. Н. Г. Валиев, к. т. н. В. С. Шестаков

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

Переработка глины и другого керамического сырья, особенно сухого, неизбежно ведет к появлению пыли. Источниками пылевыделения на дробильно-сортировочном комплексе являются дробилки, грохоты, узлы перегрузок. Содержанию пыли в воздухе после прохождения ее через тканевый фильтр составляет 0,7–3,4 мг/м<sup>3</sup>. Кроме пыли, выделяются диоксиды серы и оксиды азота (продукты сгорания тяжелого мазута). Количество выбросов при сухом измельчении после соответствующей системы фильтрации составляет: диоксид серы 0,02–0,20 г/м<sup>3</sup>, оксиды азота (в пересчете на NO<sub>2</sub>) 0,1–0,14 г/м<sup>3</sup>. Присутствие пыли в воздухе рабочей зоны вредно влияет не только на организмы работающих, но и усложняет работу механизмов: пыль попадает в подшипники и трущиеся части машин, вызывая их быстрый износ. Вибрационные грохоты применяют в основном для разделения неметаллических полезных ископаемых, таких как доломит, керамзит, гранит, асбест, слюда, а также могут быть использованы для очищения глин от твердых включений при производстве огнеупоров и керамики. Тщательная герметизация укрытий грохотов на 80–90 % гарантирует отведение выбросов пылевоздушной смеси за пределы укрытий. Герметизация осуществляется путем размещения прокладок из резины и войлока в зонах стыков и соединений частей. Наибольшая эффективность работы обеспыливающей вентиляции (аспирации) достигается в том случае, если пыль удаляется в зоне ее образования. Актуальность работы

вентиляции обусловлена необходимостью снижения затрат при производстве керамзита.

При анализе затрат энергии в технологическом процессе производства керамзита выявлено, что наряду с другими процессами (добыча исходного сырья, получение гранул, обжиг) значительная доля приходится на грохочение. При этом потребление энергии значительно связано с необходимостью отвода образующейся при грохочении пыли из помещения. Пыль отводится вентиляторами; с учетом больших размеров помещений для размещения грохотов приходится устанавливать вентиляторы высокой мощности.

Авторами предложен вариант изменения конструкции грохота с использованием полых колосников с отверстиями. Вентиляторы через балку, к которой крепятся колосники, обеспечивают удаление пыли через колосники непосредственно из зоны пылеобразования, что позволит уменьшить объем воздуха и, соответственно, затраты электроэнергии.

Расчет площади просеивающей поверхности, линейных размеров колосника для реальных размеров колосника выполнен исходя из требуемой производительности. Проведены прочностные расчеты для определения сечений колосников и узлов их крепления к балкам. С учетом переменности сечения отверстий и колебаний колосников расчет напряжений предлагается выполнять методом конечных элементов в системе APM WinMachine в модуле Structure 3D.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

### КОВШОВЫЙ ЭЛЕВАТОР ДЛЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

(✉)

E-mail: davidovtrans@yandex.ru

© Д. т. н. С. Я. Давыдов<sup>1</sup> (✉), д. т. н. Г. Г. Кожушко<sup>2</sup>, А. Л. Ухов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Анализ различных видов карьерного транспорта позволил сделать вывод о перспективности использования ковшовых ленточных конвейеров на карьерах с большой глубиной. При разработке проекта по применению циклично-поточной технологии с транспор-

тированием горной массы крутопадающими конвейерами в карьере Джетыгаринского месторождения хризотила в контурах карьера I очереди (отметка –100 м) по запросу АО «Костанайские минералы» был предложен ковшовый ленточный конвейер с повышенной

тяговой способностью. Цель работы — установление основных зависимостей между геометрическими, режимными, силовыми и энергетическими параметрами для определения рациональных характеристик крутонаклонных конвейеров, применение которых позволит обеспечить повышение технико-экономических показателей транспортирования хризотила. Хризотил — минерал группы серпентинита, представляющий собой силикат магнезия  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , способный расщепляться на тонкие волокна. Карьер Джетыгаринского месторождения хризотила АО «Костанайские минералы» имеет производственную мощность

400 тыс. т в год. Плотность хризотила 2,4–2,6 г/см<sup>3</sup>, коэффициент трения по металлу 0,8.

Отличительной конструктивной особенностью ковшового ленточного конвейера является то, что боковые поверхности тяговых гибких тросовых лент снабжены зубчатыми гибкими ремнями. Наличие реечной зубчатой передачи при вращении приводного барабана, особенно при запуске приводов, исключает проскальзывание лент относительно обечеек барабана и перекокс одной ленты относительно другой. Это не только повышает надежность работы конвейера, но и уменьшает энергозатраты при сохранении производительности конвейера.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

### ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ АВТОКЛАВОВ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА

(✉)

E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. т. н. **С. Я. Давыдов**<sup>1</sup> (✉), **А. А. Михалицин**<sup>2</sup>, **О. В. Михалицина**<sup>2</sup>, **А. В. Катаев**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Южноуральский завод «Кристалл», г. Южноуральск, Россия

<sup>3</sup> ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Побочный продукт автоклавного производства искусственных кристаллов кварца Южноуральского завода «Кристалл» представляет собой прочный монолитный материал с полной молочной непрозрачностью, разрушающийся от механического воздействия без заметной пластической деформации. В результате проведенных экспериментов установлено, что побочный продукт автоклавного производства кристаллов кварца имеет гомогенную структуру и однородный химический состав с массовым содержанием компонентов, %: Si 62,31, O 36,53, Al 1,16. По данным рентгеновского энергодисперсионного анализа, материал представляет собой синтетический алюмосиликат с высоким содержанием (97,88 мас. %) оксида кремния (II).

Были проведены опытные работы по разрушению опытного образца — куска побочного продукта автоклавного производства на экспериментальной пескоструйной установке. Подача материала на удаляемый слой нароста на дне автоклава осуществлялась сжатым воздухом с помощью соплового эжектора. При этом использовали мягкий «абразивный» порошок (крупность 0,5–2,0 мм), полученный из купершлака (отходы цветной металлургии), который не вызывает абразивной эрозии металлических поверхностей. Параметры работы экспериментальной установки: диаметр сопла 5 мм, давление сжатого воздуха 3,5 ат, расход воздуха 2,5 м<sup>3</sup>/мин. Размеры выработки в образце: диаметр (средний) 32 мм, глубина 70 мм, длительность обработки 1 мин, расход порошка 1 кг/мин.

Пересчет на опытное устройство для испытаний (3 варианта): диаметр пятна очистки 1000 мм, толщина пятна очистки 100 мм, объем выработки 78540 см<sup>3</sup>. Вариант № 1: диаметр сопла 10 мм, давление сжатого воздуха 4,5 ат, расход воздуха 12,5 м<sup>3</sup>/мин, расход порошка 5 кг/мин, длительность обработки 82 мин. Вариант № 2: диаметр сопла 9 мм, давление сжатого воздуха 4,5 ат, расход воздуха 10 м<sup>3</sup>/мин, расход порошка 4 кг/мин, длительность обработки 113 мин. Вариант № 3: диаметр сопла 8 мм, давление сжатого воздуха 4,5 ат, расход воздуха 8 м<sup>3</sup>/мин, расход порошка 3 кг/мин, длительность обработки 160 мин. Во время очистки параллельно осуществляется аспирация полости автоклава — вывод вытесняемого и отработанного воздуха вместе с частицами пыли. После очистки со дна автоклава удаляются измельченный нарост и отработанный порошок способом вакуумного пневмотранспорта. Отработанный воздух очищается в циклоне и рукавном фильтре (возможно использование системы аспирации цеха).

Воздуходувный агрегат включает компрессор и вытяжной вентилятор (воздуходувку). При использовании сетей предприятия для снабжения системы сжатым воздухом и создания вакуума этот агрегат не требуется, а осуществляется подключение системы к сетям предприятия. Все узлы и агрегаты системы очистки являются мобильными, имеют незначительные габариты; для соединения применяются гибкие трубопроводы.

ОБОРУДОВАНИЕ  
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ**ГИДРОВИХРЕВОЙ СТРАТИФИКАТОР ВЕНТУРИ  
ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ**(✉)  
E-mail: davidovtrans@mail.ru© Д. т. н. **В. Н. Макаров**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉), к. т. н. **Н. В. Макаров**, **А. Ю. Матеров**  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Работа посвящена разработке гидровихревого стратификатора Вентури и направлена на решение актуальной задачи технологических переделов производства строительных материалов, связанных с измельчением исходных компонентов, повышением степени извлечения фракций заданной крупности и снижением энергоёмкости производства. В частности, высокие требования к медианным размерам и дисперсии частиц предъявляются при подготовке исходных компонентов в производстве высокопрочных цементов, огнеупорных материалов и легирующих элементов для композитных материалов и сплавов. Для этих процессов важным условием обеспечения высокого качества готового продукта является использование микро- и наноразмерных частиц крайне жестко детерминированного класса крупности, что не в полной мере можно реализовать существующими и применяемыми традиционными средствами сепарации.

Новизна предлагаемого в данной работе способа стратификации базируется на научно обоснованной и экспериментально подтвержденной гипотезе об уменьшении медианного размера смачиваемой наночастицы, аэрированной каплей воды, с увеличением угловой скорости вращения капли вокруг вектора скорости ее поступательного движения. С использованием этой гипотезы разработан математический аппарат гидровихревой стратификации и обоснованы следующие параметры: геометрические размеры трубы Вентури, азратора с форсунками, давление воздуха, частота вращения форсунок, угловая скорость вращения капель.

Конструктивно стратификатор Вентури представляет собой трубу Вентури, по которой снизу вверх под давлением воздуха поступает исходный сыпучий материал, представляющий собой отходы основного производства, формируя тем самым так называемый кипящий слой. На определенном участке в трубопроводе установлены гидровихревые форсунки, центробежно распыляющие кап-

ли жидкости. Благодаря разработанной математической модели обоснованы геометрические параметры трубы Вентури и азратора, оснащенного гидровихревыми форсунками, способными формировать такие значения угловой скорости вращения капель жидкости, которые позволят воздействовать только на частицы заданного узкого класса крупности. Эти дисперсные частицы увлекаются распыленными каплями в боковые кольцевидные ниши с последующим поступлением в бункер, а оставшиеся частицы либо осаждаются на дне трубопровода, либо поднимаются в бункер отходов.

Установлено, что при поступательном движении капли жидкости медианный размер смачиваемой частицы карбида кремния равен 6 мкм, а при угловой скорости вращения капли жидкости  $10^5$  1/с медианный размер равен 0,5 мкм. Построенный математический аппарат позволил спроектировать гидровихревой стратификатор Вентури, в котором наночастицы, двигаясь вертикально вверх в кипящем слое с определенной скоростью и попадая в зону действия азратора с гидровихревыми форсунками, расслаиваются и поступают в бункера с заранее заданными медианными размерами и дисперсией. Таким образом, ключевым преимуществом стратификатора Вентури по сравнению с другими средствами сепарации является возможность вести сепарацию на таких уровнях крупности (микро- и наноразмеры 0,5–15 мкм) и с такой степенью точности (95–97 % содержания заданной фракции в общей массе отбора по кривой Тромпа), которые технически и технологически недостижимы у аналогов. Это обеспечивается за счет создания условий для гидровихревой коагуляции, когда сепарация частиц обусловлена непосредственным контактом капли жидкости и самой частицы. Селективность сепарации обусловлена комплексом параметров (геометрические параметры трубы Вентури, азратора и форсунок, угловая скорость вращения капель жидкости и кипящего потока частиц).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**СРАВНЕНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ  
АНДАЛУЗИТА С ОГНЕУПОРАМИ НА ОСНОВЕ БОКСИТОВ И СПЕЧЕННОГО МУЛЛИТА**(✉)  
E-mail: florian.ahouanto@imerys.com© **Ф. Ахоунто**<sup>1</sup> (✉), **М. Вайссенбахер**<sup>2</sup>, **Б. Тузо**<sup>3</sup>, **С. Детуф**<sup>1</sup><sup>1</sup> Imerys Aluminate S.A., Париж, Франция<sup>2</sup> Imerys Technology Center, г. Филлах, Австрия<sup>3</sup> Imerys Technology Center, г. Тяньцзинь, Китай

Андалузит вызывает интерес для применения в огнеупорах как в виде заполнителей, так и в виде тонких порошков. При этом огнеупорный материал может состоять из андалузита полностью, а может содержать

его в качестве одного из компонентов. В большинстве случаев андалузит применяют благодаря незначительному изменению его объема при повышенных температурах и высокой термостойкости. Наиболее

интересным свойством андалузита является его уникальная микроструктура после муллитизации, которая обуславливает термомеханические характеристики андалузитовых материалов. Однако воспринимать андалузит только как источник муллита — значит недооценивать этот минерал, хотя он действительно превращается в муллит на 80 % в оптимальных условиях термообработки. Муллитизированный андалузит — это микроструктурный композит, состоящий из кристаллов муллита и обогащенной кремнеземом аморфной фазы. Кристаллы андалузита, в отличие от шамота, спеченного муллита или боксита, не подвергались термообработке и благодаря этому сохраняют очень высокую активность и способность реагировать с окружающими компонентами.

В работе изучены термомеханические свойства формованных и неформованных огнеупоров, содержащих несколько видов андалузитового концентрата разной степени чистоты, а также огнеупоров на основе боксита и спеченного муллита с добавкой андалузитовых материалов. Кроме таких общих характеристик, как пределы прочности при сжатии и изгибе при комнатной температуре, исследовали также высокотемпературные свойства — ползучесть и деформацию под нагрузкой. Результаты показали существенное влияние примесей на образование стеклофазы и ее вязкость при высоких температурах. Выявлено также улучшение ряда показателей, в особенности сопротивления ползучести и деформации под нагрузкой, при введении андалузита в состав огнеупоров на основе боксита или спеченного муллита.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ДИСПЕРСНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ КАК НАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ ФОСФАТНЫХ ЖАРСТОЙКИХ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

(✉)

E-mail: uralniist@mail.ru

© К. Т. Н. В. А. Абызов (✉), Н. Е. Посаднова

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

В настоящее время для изготовления фосфатных жаростойких ячеистых бетонов предполагается использование в основном чистых дисперсных наполнителей, таких как шамот, технический глинозем, корунд, оксид титана и их смеси. Однако чистые фосфатные связующие достаточно дороги, а композиции с дисперсными наполнителями, как правило, не способны длительно сохранять подвижность. В этой связи большой интерес представляет снижение себестоимости за счет введения в состав клеев активных дисперсных наполнителей из промышленных отходов, которые увеличивают сроки схватывания связующего за счет нейтрализации ортофосфорной кислоты (ОФК), в том числе за счет увеличения степени перехода  $Al^{3+}$  и  $Cr^{3+}$  в кислые фосфаты. Одним из возможных путей модифицирования фосфатных материалов является использование недорогих алюмосиликатных материалов — глин и обладающих более высокой химической активностью продуктов их обжига. В качестве наполнителей предлагается использовать отработанный алюмохромовый катализатор нефтехимического производства с удельной поверхностью 4000–4500  $cm^2/g$  и содержанием  $Al_2O_3$  70–76 %, а также алюмосиликатные отходы — пыль от фильтров шамотного производства с содержанием  $Al_2O_3$  30–32 %. Выбор дисперсных наполнителей обусловлен тем, что они являются побочными продуктами крупных производств, что положительно характеризует постоянно их физико-механических свойств и химического состава. За счет высокой дисперсности, а также особенностей состава эти материалы достаточно активны по отношению к ОФК.

Известны связующие на основе ОФК и огнеупорной глины (глинофосфатная связка). Однако для формирования связки необходимы нагрев или длительная выдержка глины в ОФК при перемешивании. Ускорить процесс формирования алюмо- и силикофосфатов можно, используя более активное сырье. Пыль от фильтров, как продукт низкотемпературного обжига глины, представляет собой смесь дисперсных частиц шамота и дегидратированной глины, которая реагирует с ОФК без применения помола и нагрева. Присутствие активного глиноземистого компонента обеспечивает быстрое формирование в жидкой фазе глинофосфатной связки.

В процессе исследования сырьевых материалов для фосфатных жаростойких бетонов отмечено, что глина, используемая для производства шамота, содержит меньше  $Al_2O_3$ , чем пыль, оседающая на электрофильтрах трубных мельниц. Это объясняется искусственным обогащением пыли на электрофильтрах за счет воздушной классификации частиц шамота при помоле: легкие глинистые частицы, состоящие преимущественно из  $Al_2O_3$ , оседают в системе аспирации мельниц, в то время как тяжелые частицы кварцевого песка, также входящего в состав глины, остаются в мельнице.

В настоящее время подобраны составы фосфатных жаростойких ячеистых бетонов на основе дисперсных промышленных отходов. Продолжается работа по изучению физико-механических и теплофизических характеристик полученных материалов, а также их фазового состава. Положительные результаты исследования позволят продолжить разработку технологии фосфатных жаростойких ячеистых бетонов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**ЖАРОСТОЙКИЙ ФОСФАТНЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ  
АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**(✉)  
E-mail: uralniist@mail.ru© К. т. н. **В. А. Абызов** (✉), **Н. Е. Посаднова**

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

Одним из современных направлений повышения эффективности тепловых агрегатов является применение их в футеровке жаростойких теплоизоляционных материалов. Используют преимущественно мелкоштучные огнеупорные изделия (шамотные ультралегковесные и пенокорунд). Их технология чрезвычайно энергоемка, кроме того, она не позволяет получать крупногабаритные изделия. Ячеистые жаростойкие бетоны лишены указанных недостатков. Наиболее высокой температурой применения обладают ячеистые бетоны на основе фосфатных связующих — в интервале 1400–1600 °С.

В УралНИИстромпроекте и Южно-Уральском государственном университете разработана технология изготовления ячеистых жаростойких бетонов, в которой для поризации и твердения бетона используются газовыделение и экзотермия реакции дисперсного металлического алюминия с фосфатными связующими. Получены ячеистые бетоны со средней плотностью 400–1100 кг/м<sup>3</sup> и максимальной температурой применения до 1600 °С.

Значительный научный и практический интерес представляют вопросы расширения сырьевой базы для жаростойкого фосфатного газобетона — поиск новых материалов, пригодных для получения связующих и огнеупорных заполнителей. В качестве наполнителей использовали тонкомолотый шамот, отработанный высокоглиноземистый катализатор нефтехимического производства с удельной поверхностью 3800–4600 см<sup>2</sup>/г

и содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 70–75 %, а также дисперсные огнеупорные алюмосиликатные отходы — пыль от фильтров производства шамота с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не менее 32 %. Отходы дисперсны, не требуют помола, благодаря особенностям своего состава обладают высокой активностью по отношению к ортофосфорной кислоте.

Фосфатную связку для жаростойкого бетона готовили также на основе отходов шамотного производства, путем растворения их в 60 %-ной кислоте и последующего отделения непрореагировавших компонентов декантацией.

Получено жидкое фосфатное связующее алюмосиликофосфатного состава со средней плотностью 1,46–1,48 г/см<sup>3</sup>, способное сохранять свои свойства не менее 6 мес. Огнеупорность вяжущей композиции на основе разработанного связующего и высокоглиноземистого катализатора не ниже 1700 °С.

С использованием разработанного связующего, тонкомолотого шамота и шамотного заполнителя фракции мельче 1 мм был получен жаростойкий фосфатный газобетон средней плотностью 500–700 кг/м<sup>3</sup>, с пределом прочности при сжатии 1,3–3,0 МПа. Температура применения жаростойкого ячеистого бетона составляет 1400–1500 °С. Замена шамота корундовым заполнителем обеспечивает повышение температуры применения до 1500–1600 °С. В настоящее время проводятся работы по совершенствованию технологии и изучению жаростойких свойств ячеистого фосфатного бетона.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**ГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ВЯЖУЩИЕ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ  
ДОБАВКАМИ ШЛАКА ФЕРРОТИТАНА И СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРАМИ  
НА ОСНОВЕ ЭФИРОВ ПОЛИКАРБОКСИЛАТОВ**(✉)  
E-mail: uralniist@mail.ru© К. т. н. **В. А. Абызов** (✉), **С. Н. Черногорлов**

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

В настоящее время для получения легких и ячеистых жаростойких бетонов с температурой применения 1100–1300 °С используют глиноземистые цементы и жидкостекольные композиции. Более огнеупорные фосфатные связующие и высокоглиноземистый цемент применять в данном температурном интервале нецелесообразно. Глиноземистый цемент отличается быстрым твердением и высокой прочностью, однако склонен к сбросу прочности в 14–28 сут твердения. Известно, что менее склонны к снижению прочности цементы с меньшей активностью (менее тонкого помола или с пониженным содержанием СА). Введение глиноземистых и высокоглиноземистых промышленных отходов (отходов производства корунда, отсевов носителя высокоглиноземистого

катализатора) обеспечивает снижение содержания моноалюмината кальция, повышает огнеупорность глиноземистого цемента и существенно уменьшает его себестоимость.

В работе в качестве добавки применяли две разновидности шлака алюминотермической выплавки ферротитана — продукты плавленные глиноземистые ППГ-65 (содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не менее 65 %) и ППГ-65К (разновидность, обогащенная СаО) по ТУ 0798-069-00186482–2011 производства Ключевского завода ферросплавов. Минеральный состав титаноглиноземистого шлака представлен огнеупорными соединениями — титанистым бонитом СаО·6(Al,Ti)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, перовскитом СаО·TiO<sub>2</sub>, небольшим количеством корунда, СА и Са<sub>2</sub>. Это определяет его высокую огнеупорность в

зависимости от минерального состава — в интервале 1680–1770 °С.

Добавки ППГ-65 и ППГ-65К вводили в глиноземистый цемент ГЦ 50 (Пашийский цементно-металлургический завод) и Secar38 (Kerneos, Франция). Тонкость помола добавок была выше, чем у глиноземистого цемента, — не менее 3600 см<sup>2</sup>/г. Для предотвращения снижения прочности, вызванного введением шлака, менее активного, чем глиноземистый цемент, применяли водоредуцирующие добавки на основе эфиров поликарбоксилатов (PCE). Наилучшие результаты достигнуты при использовании Melflux 1641F, Melflux 2641F (производства BASF). Предел прочности модифицированного глиноземистого цемента к 3 сут достигает 35–45 МПа, к 7 сут 45–50 МПа. Установлено, что при оптимальных соотношениях исходных компонен-

тов у вяжущего не происходит снижения прочности в 14–56 сут твердения и рост прочности продолжается. Это объясняется тем, что процессы перекристаллизации гексагональных гидроалюминатов в кубические происходят под влиянием добавок медленнее.

Разработанное глиноземистое вяжущее имеет нормальные сроки схватывания (начало схватывания не ранее 45 мин), марку не ниже ГЦ 40. Остаточная прочность жаростойкого бетона на шамоте после обжига при 800 °С при использовании разработанного вяжущего увеличивается на 20–30 %. С его использованием были выпущены две опытных партии сухих смесей — на тяжелом (шамот) и легком (вермикулит) заполнителях, используемых для получения жаростойкого бетона. В настоящее время проводятся испытания в промышленных условиях.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### МУЛЛИТОКОРУНДОВАЯ БЕТОННАЯ СМЕСЬ С КВАРЦСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКОЙ

✉

E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

© К. т. н. Л. А. Бабкина, к. т. н. Л. К. Савина ✉, Л. М. Щербак, А. С. Тинигин

АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного», г. Харьков, Украина

Одним из наиболее эффективных способов формирования муллитовой фазы в структуре муллитокорундовых неформованных огнеупоров в процессе эксплуатации является введение в состав сухих смесей кварцесодержащих компонентов, которые обеспечивают повышение текучести бетона и сокращение срока его твердения.

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология изготовления муллитокорундовой бетонной смеси с активной кварцесодержащей добавкой производства Украины. Установлено, что частичная замена высокоглиноземистого цемента на активную кварцесодержащую добавку в муллитокорун-

рундовой бетонной смеси обеспечивает улучшение структурно-реологических характеристик бетона, его удобоукладываемости и прочностных свойств.

Разработанная муллитокорундовая бетонная смесь с кварцесодержащей добавкой характеризуется следующими показателями: массовая доля Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 72,0 %, CaO 4–5 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> менее 1,0 %; предел прочности при сжатии образцов бетона после 3 сут твердения и термообработки при 110 °С 87 МПа. Муллитокорундовая бетонная смесь рекомендуется для футеровки тепловых агрегатов и изготовления изделий сложной конфигурации при температуре службы до 1550 °С.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### КЕРАМИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКОВЫЕ ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

✉

E-mail: ogmet@uecrus.com

© К. т. н. Т. Ф. Баранова<sup>1</sup> ✉, Н. Н. Петерс<sup>1</sup>, С. И. Полянский<sup>1</sup>, В. А. Михайлов<sup>1</sup>, М. А. Горбаненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «ОДК» Производственный комплекс «Салют», Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Технокерамика», дер. Верховье Калужской обл., Россия

Надежность и долговечность газовых турбин при производстве газотурбинных двигателей решается за счет применения жаропрочных никелевых сплавов. Для сокращения расходов на весь жизненный цикл двигателя необходимо постоянно улучшать и удешевлять технологический процесс изготовления его деталей (например, литых лопаток). Надежность литых лопаток зависит от их качества, которое определяется (кроме типа используемого металлического сплава) технологическим процессом их литья в керамические оболочковые формы, в основном из белого электрокорунда. Литейные формы должны обеспечивать получение качественных отливок с высокой размерной точностью.

В серийной послойной технологии изготовления форм по выплавляемым моделям имеются две основные операции с применением огнеупорного материала: приготовление суспензии для нанесения слоев керамического покрытия и обсыпка каждого слоя покрытия. Состав суспензии: гидролизированный этилсиликат (исходное сырье ЭТС-40, ГОСТ 26371) и наполнитель из электрокорундовых порошков (или из дистен-силлиманитового концентрата) по ТУ 3988-075-00224450-99, ГОСТ 28818 и ТУ У 14-10-017-98. Основным производителем электрокорундовых порошков является АО «Русал», а дистен-силлиманитового концентрата — Украина. Для расширения возможности

использования электрокорундовых порошков других производителей проведены технологические исследования при изготовлении литейных форм с применением электрокорундовых порошков производства ООО «Технокерамика», Россия.

Для изготовления суспензии использовали порошки фракций F 1200, F 360 и F 280, основной фазой которых, как и в серийных порошках, является  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Для обсыпки слоев керамического покрытия использовали порошки F 70 и F 36. При изготовлении литейных форм из опытных порошков полностью сохранены технологические параметры серийного процесса их получения и технические свойства литейных форм. Прочность материала опытных форм, предназначенных для литья лопаток равноосной структуры, 124–146 кг/см<sup>2</sup>, а для серийных 115–132 кг/см<sup>2</sup>. Материал форм для литья лопаток направленной структуры имел прочность 190–270 кг/см<sup>2</sup>, а у серийных форм 98–133 кг/см<sup>2</sup>.

Формы испытаны при литье деталей равноосной и направленной структур из никелевых сплавов, содержащих легирующие химически активные добавки

металлов Cr, Re, W, Mo, Ti, Co и др. Полученные отливки по химическому составу и механическим свойствам (кратковременная и длительная прочность) соответствовали применяемым сплавам ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ — равноосная структура, ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ — направленная структура, что отвечает требованиям нормативных документов ОСТ и ТУ. Все отливки, изготовленные в опытных и серийных формах, прошли технический контроль на металлургические дефекты. Количественные значения дефектов практически одни и те же как на опытных отливках, так и на серийных.

Таким образом, отливки деталей из жаропрочных никелевых сплавов, выплавленные в литейных керамических формах из электрокорундовых порошков ООО «Технокерамика», соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к авиационным деталям газотурбинных двигателей. По результатам проведенных работ электрокорундовые порошки, выпускаемые ООО «Технокерамика», предложены для серийного производства турбинных лопаток и других деталей из жаропрочных сплавов.

### SiC–Si-ПОКРЫТИЯ С ДОБАВКАМИ ТУГОПЛАВКИХ БОРИДОВ $\text{ZrB}_2$ И $\text{HfB}_2$ ДЛЯ ЗАЩИТЫ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ОКИСЛЕНИЯ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ



E-mail: nikbardin@mail.ru

© Н. Г. Бардин<sup>1</sup> (✉), д. т. н. Ю. И. Кошелев<sup>1</sup>, А. А. Швецов<sup>1</sup>, А. В. Кузнецов<sup>1</sup>, д. т. н. Н. А. Макаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», кафедра химической технологии керамики и огнеупоров, Москва, Россия

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) имеют уникальные физико-механические и теплофизические характеристики, что делает их практически безальтернативными материалами во многих областях применения, таких как авиационно-космическая отрасль, оборудование для получения и исследования высокотемпературных материалов, машиностроение и т. д. Тем не менее использование УУКМ в высокотемпературной кислородсодержащей атмосфере крайне ограничено вследствие начала их активного окисления при температурах выше 500 °С. Объемное силицирование в значительной степени проблемы не решает, поэтому возникает необходимость в поверхностной модификации УУКМ для защиты углеродной составляющей материала от окисления. Повышение стойкости к окислению углерод-углеродных материалов в кислородсодержащей атмосфере при температурах выше 1400 °С возможно благодаря поверхностному силицированию шликерно-обжиговым методом, в результате чего на композите формируется плотный слой состава SiC–Si, который защищает УУКМ от окисления в воздушной атмосфере до температур 1600–1700 °С. Для дальнейшего повышения температуры эксплуатации УУКМ (> 1700 °С) необходимо добавление в шликерную суспензию порошков тугоплавких боридов циркония

или гафния для получения на УУКМ покрытия системы  $\text{MeB}_2\text{-SiC-Si}$ . При работе такого покрытия в воздушной атмосфере при высоких температурах на его поверхности образуется оксидная пленка, в состав которой входят тугоплавкие оксиды и ортосиликаты циркония или гафния, препятствующая дальнейшему проникновению кислорода вглубь материала.

В работе шликерно-обжиговым методом были получены покрытия систем  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-Si}$  и  $\text{HfB}_2\text{-SiC-Si}$  на УУКМ со схемой армирования 4D-L. Выявлено, что для образования на 4D-L-УУКМ бездефектных покрытий  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-Si}$  и  $\text{HfB}_2\text{-SiC-Si}$  с содержанием в них боридов порядка 45–50 об. % и микротвердостью до 13 ГПа необходимо применение шликерной суспензии вязкостью около 280 мПа·с с содержанием в ней дисперсной фазы состава 50 мас. %  $\text{Me}(\text{Zr, Hf})\text{B}_2 + 30$  мас. % Si + 20 мас. % C. Обнаружено, что для достижения максимальной микротвердости покрытий  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-Si}$  и  $\text{HfB}_2\text{-SiC-Si}$  (13 ГПа) необходимо нанесение на поверхность УУКМ промежуточного подслоя SiC–Si толщиной 40–50 мкм.

Проведены испытания окислительной стойкости УУКМ с покрытиями системы  $\text{Me}(\text{Zr, Hf})\text{B}_2\text{-SiC-Si}$  в среде статичного и потоке диссоциированного воздуха на плазмотроне. Введение в исходную шликерную суспензию добавок тугоплавких боридов циркония и гафния зна-

чительно повышает стойкость УУКМ к окислению в воздухе при высоких температурах: скорость потери массы материала с покрытиями  $ZrB_2-SiC-Si$  и  $HfB_2-SiC-Si$  при 1600 °C ниже на 3 порядка, а энергия активации окисления выше более чем в 2,5 и 3,2 раза, чем у несилицированного УУКМ и объемно-силицированного углеродного композита соответственно. Разницы в окислительной стойкости материалов с такими типами покрытий практически нет. Испытания в потоке диссоциированного воздуха на плазмотроне показали, что при температуре

2000 °C и длительности испытания 800 с покрытие  $HfB_2-SiC-Si$  сохранило свою целостность и состав, снижения массы образцов с нанесенным слоем не наблюдалось, а их линейные размеры немного увеличились за счет образования оксидной пленки на поверхности.

Полученные результаты позволяют рекомендовать покрытия составов  $ZrB_2-SiC-Si$  и  $HfB_2-SiC-Si$  на УУКМ в качестве защитных от окисления в среде диссоциированного воздуха при температурах выше 1700 °C.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)  
E-mail:  
belog\_oa@chemy.kolasc.net.ru

## НЕФОРМОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ КОВДОРСКОГО ГОКА

© К. т. н. О. А. Белогурова (✉), М. А. Саварина, Т. В. Шарай

ФГБУН «Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева» — обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН», г. Апатиты Мурманской обл., Россия

Технология обогащения комплексных железных руд Ковдорского месторождения предусматривает последовательное выделение железорудного (магнетитового), апатитового и бадделеитового концентратов. Состав отходов обогатительного производства, мас. %: форстерит 38–48, кальцит 21–30, флогопит 10–11, неизвлеченная часть основных продуктов. Перспективы развития предприятия связаны с увеличением полноты и комплексности извлечения полезных компонентов и получением новых видов продукции, одним из которых является форстерит.

Цель работы — исследование форстеритового концентрата, полученного из отходов обогатительного производства Ковдорского ГОКа, для изготовления неформованных огнеупоров. Химический состав форстеритового концентрата, мас. %:  $MgO$  43–48,  $SiO_2$  33–39,  $FeO$  4,4–5,3,  $Fe_2O_3$  0,8–5,9,  $CaO$  0,6–2,4,  $\Delta m_{прк}$  0,1–1,5. Основные технологические этапы получения бетона: в шихту вводили магний-фосфатную связку, перемешивали и укладывали в форму. После твердения в течение 2 сут образцы обжигали при 450–1200 °C, затем определяли их свойства: плотность, изменение объема и прочность при сжатии. Бетон из сырого форстеритового концентрата обладал плотностью до 1450  $кг/м^3$  и пределом прочности при сжатии до 1,5 МПа; после обработки бетона при 450 °C его предел прочности при сжатии снизился до 0,8 МПа. У бетона из брикета эти показатели составили соответственно 2230  $кг/м^3$  и 12,0 МПа (25 °C), 2060  $кг/м^3$  и 15 МПа (450 °C).

Далее исследование продолжили с шихтой на основе брикета двух составов, мас. %: состав 1 — форстеритовый концентрат фракции мельче 0,2 мм 60 %, мельче 0,063 мм 15 %, бой магнетитовых изделий 25 %; состав 2 — соответственно 50, 15 и 35 %. Температура первоначального обжига брикета влияет на изменение объема после термообработки в диапазоне 600–1000

°C. У образцов из брикета, обожженного при 1300 °C, изменение объема составляет 1,8 %, тогда как у образцов из брикета, обожженного при 1400 °C, 0,5 %. Для получения зависимости свойств бетона от количества тонкой фракции в шихте использовали брикеты составов 1 и 2 при следующем соотношении фракций, мас. %: <3 мм 80 и <0,063 мм 20; <3 мм 70 и <0,063 мм 30; <3 мм 60 и <0,063 мм 40; <3 мм 50 и <0,063 мм 50. Диапазон термообработки бетона от 25 до 1200 °C.

Бетон из брикета состава 1 в большей степени спекается при 1200 °C, чем из брикета состава 2; изменение объема в первом случае достигает 22 %, во втором 3,6 %. Вероятно, это связано с меньшим количеством оксида магния, который дополнительно введен в форстеритовый концентрат при изготовлении брикета. В состав шихты для бетона из брикета состава 1 рекомендуется вводить от 20 до 30 мас. % фракции мельче 0,063 мм, так как при большем ее количестве увеличиваются объемные изменения при 1100 °C и происходит резкий скачок спекания при 1200 °C. Шихта для получения бетона из брикета состава 2 должна содержать до 40 % фракции мельче 0,063 мм, так как при этом получены высокие показатели прочности и плотности, а уменьшение объема при 1200 °C не так резко выражено.

По результатам исследований был подобран зерновой состав шихты для бетона, найдено соотношение заполнителя и магнийфосфатной связки, показано влияние состава брикета и температуры термообработки образцов из брикета на физико-технические свойства бетона. Построены графики изменения объема и прочности бетона после термообработки в зависимости от состава брикета. Получены бетоны со следующими характеристиками: плотность 2170–2260  $кг/м^3$ , предел прочности при сжатии до 49 МПа (при 25 °C), изменение объема после термообработки при 450–1000 °C 1–2 %.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА СО СТРУКТУРИРОВАННЫМ РАБОЧИМ СЛОЕМ ДЛЯ СВЕРЛЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ**

(✉)  
E-mail: sc@deltaplant.ru,  
av\_bel@bk.ru

© Д. х. н. **А. В. Беляков**<sup>1</sup>, **С. И. Церман**<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», кафедра химической технологии керамики и огнеупоров, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Дельта» группы компаний «Адель», Москва, Россия

Сверление относится к наиболее интенсивным операциям механической обработки хрупких неметаллов полусухим и сухим способами. Режущий слой должен выдерживать высокие механические и термические нагрузки и обеспечивать удаление продуктов резания из рабочей зоны. Для сверления средних и крупных отверстий в материале высверливают цилиндрический керн при помощи кольцевого сегментного сверла. Жесткие условия эксплуатации сверл обуславливают высокие требования к материалам для изготовления сегментов. Это требования к алмазным режущим зернам по статической и динамической прочности и термостойкости, по прочности, твердости, теплопроводности и удержанию алмазов металлической матрицей сегментов. Важны также доступность материалов и их низкая цена.

В процессе сверления вся поверхность режущего слоя находится в постоянном и непрерывном контакте со всей поверхностью отверстия в образце. В данном случае трудно говорить о цикличности воздействия, т. е. о повторяющихся переменных нагрузках. Однако режущий слой состоит из цепочек единичных резцов-алмазов, каждый из которых срезает свою стружку с огнеупора, и это можно условно считать низшим уровнем цикличности взаимодействий в зоне резания. При сегментной конструкции режущего слоя доля долгу цикличности (высшего уровня) в образование стружки вносит каждый сегмент. В предыдущих исследованиях для повышения эффективности обработки на операциях резки и шлифова-

ния были рассмотрены структурированные сегменты, разделенные на отдельные алмазные агрегаты с «твердой» матрицей, связанные между собой «мягкой» безалмазной матрицей. Также и при сверлении, «раздробив» сегменты на отдельные алмазные агрегаты (фрагменты, режущие модули), обеспечивается снятие стружек отдельно каждым из алмазных фрагментов (средний уровень цикличности). При такой конструкции сегментов под их структурой понимают количество агрегатов в сегменте, концентрацию алмазов в агрегатах, составы алмазной и безалмазной связок. Значение этих параметров выбирают в зависимости от свойств обрабатываемых материалов, конструктивных параметров сверлильной установки и интенсивности нагрузки на сверло.

Обобщение опыта механической обработки структурированным алмазным инструментом позволило сделать вывод, что с точки зрения конструкции инструмента эффективна двухступенчатая классификация по обрабатываемости огнеупорных материалов: легкообрабатываемые и труднообрабатываемые. Это позволило предложить две конструкции структурированного инструмента с оптимизированными параметрами. Для тестирования различных материалов предложена несложная лабораторная методика определения статического критерия обрабатываемости по аналогии с оценкой горных пород. Методика основана на склерометрических измерениях. Это подтверждено данными по обработке ряда материалов: горных пород, огнеупоров, керамики.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

**ЗАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНАТОВ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ**

(✉)  
E-mail:  
petr.gudovskikh@imerys.com

© **П. С. Гудовских**<sup>1</sup> (✉), **Кр. Вохмаер**<sup>2</sup>, **Кр. Парр**<sup>3</sup>, **М. Цеписдин**<sup>4</sup>, **Б. Тузо**<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ООО «Имерис Алюминейтс», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Imerys Aluminate GmbH, г. Оберхаузен, Германия

<sup>3</sup> Imerys Aluminate S.A., Париж, Франция

<sup>4</sup> Imerys Technology Center, г. Лион, Франция

<sup>5</sup> Imerys Technology Center, г. Тяньцзинь, Китай

Огнеупорные бетоны для футеровки сталеразливочных ковшей, как правило, представляют собой высокоплотные материалы и обладают устойчивостью к воздействию высоких температур, жидкого металла и шлаков. С другой стороны, высокая плотность вызывает также и высокую теплопроводность материалов, что приводит к повышенным потерям тепла через футеровку ковша. Обычно матрица огнеупорного бетона наиболее уязвима к воздействию расплава. Поэтому необходимо выяснить, действительно ли следует ис-

пользовать только высокоплотные заполнители в огнеупорных бетонах для футеровки сталеразливочных ковшей. Введение более пористых заполнителей позволяет получить бетоны с меньшей плотностью, что, в свою очередь, приведет к снижению массового расхода материала и уменьшению тепловых потерь. В то же время и термомеханические свойства, и устойчивость к воздействию расплава остаются важнейшими параметрами при выборе оптимального материала для футеровки ковша.

Поскольку положительное влияние систем на основе алюминатов кальция и магния на шлакоустойчивость матрицы огнеупорных бетонов уже достаточно хорошо изучено, исследовали влияние микропористых заполнителей на основе алюминатов кальция и

магния на свойства шпинелесодержащих бетонов. Показано, что заполнители марки MagArmour на основе системы оксидов  $Al_2O_3$ – $CaO$ – $MgO$  могут быть успешно применены в огнеупорных бетонах для футеровки сталеразливочных ковшей.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: dva\_vadjik1975@mail.ru

### ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ $Al_2O_3$ – $ZrO_2$ – $SiO_2$ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ

© К. т. н. **В. А. Дороганов** (✉), к. т. н. **Е. А. Дороганов**, **О. В. Гавшина**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова»,  
кафедра технологии стекла и керамики, Белгород, Россия

Сочетание оксидов  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и  $SiO_2$  позволяет получить матричные системы с совокупными свойствами материалов (высокая плотность и огнеупорность, стойкость к агрессивным средам и т. д.) и создать огнеупорные композиты с набором уникальных свойств. Эти материалы получают обычно плавлением исходного сырья, содержащего эти оксиды, при высоких температурах. Авторами разработаны и исследованы огнеупорные композиты с использованием искусственного керамического вяжущего (ИКВ), полученного на основе материалов системы  $Al_2O_3$ – $ZrO_2$ – $SiO_2$ . В качестве исходного сырья для синтеза ИКВ использовали бой бадделеитокорундовых изделий на основе бакора-33 (содержание  $ZrO_2$  не менее 33 %). ИКВ получали мокрым помолом в шаровой мельнице периодического действия с постайдийной догрузкой материала по технологии высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС). В результате было получено ИКВ, характеризующееся дилатантным характером течения, плотностью  $2900 \text{ кг/м}^3$  и влажностью 15–16 %. После термообработки при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  образцы на основе ИКВ бакора-33, полученные методом литья, характеризовались открытой пористостью не более 0,5 %, кажущейся плотностью  $3200 \text{ кг/м}^3$  и пределом прочности при сжатии 230–240 МПа. На основе полученного ИКВ были разработаны и исследованы составы огнеупорных композиционных материалов, полученных методами литья, вибропрессования и пластического формования. В качестве заполнителя использовали полифракционный порошок на основе бакора-33 оптимального зернового состава.

При использовании технологии литья были изучены составы, содержащие 10–40 % заполнителя и 60–90 %

ИКВ; формовочная влажность при этом составляла 8–14 %. Образцы после обжига при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  характеризовались кажущейся плотностью  $3000$ – $3200 \text{ кг/м}^3$ , открытой пористостью 10–15 % и пределом прочности при сжатии 150–200 МПа. Применение метода вибропрессования позволило увеличить концентрацию заполнителя до 50–80 %; формовочная влажность при этом снизилась до 3–7 %. После обжига при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  образцы характеризовались кажущейся плотностью  $3100$ – $3200 \text{ кг/м}^3$ , открытой пористостью 9–13 % и пределом прочности при сжатии 130–180 МПа. Отличительной особенностью пластического способа является использование в составе формовочной массы пластифицирующей добавки в виде огнеупорной глины в количестве 9–15 %; формовочная влажность при этом составляла 9–11 %. Образцы, содержащие 50–70 % заполнителя и 21–35 % ИКВ на основе бакора-33, формовали под давлением 0,5–0,75 МПа в зависимости от состава. После обжига при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  образцы характеризовались кажущейся плотностью  $2800$ – $2900 \text{ кг/м}^3$ , открытой пористостью 15–17 % и пределом прочности при сжатии 50–70 МПа.

Таким образом, в результате проведенных исследований были разработаны составы огнеупорных композиционных материалов бадделеитокорундового состава на основе боя бакора-33, полученных разными способами формования. Разработанные материалы могут быть использованы в различных отраслях промышленности.

\*\*\*

*Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.*

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: orien.steel@mail.ru**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЗАГЛУБЛЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ  
ГАЗОПОРШКОВОЙ НЕРАСЧЕТНОЙ СТРУИ В ШЛАКОВЫЙ РАСПЛАВ**© К. т. н. Г. А. Дорофеев<sup>1</sup> (✉), к. т. н. Р. Д. Куземко<sup>2</sup>, к. т. н. В. О. Синельников<sup>3</sup>,  
А. М. К. Аль-Хабуби<sup>2</sup><sup>1</sup> ОРИЕН ТЕХНОЛОДЖИ, г. Тула, Россия<sup>2</sup> Приазовский государственный технический университет, кафедра промышленных  
теплоэнергетических установок и теплоснабжения, г. Мариуполь, Украина<sup>3</sup> «AGH» Научно-технический университет, кафедра формовочных материалов, технологий  
формы и литья цветных металлов, Краков, Польша

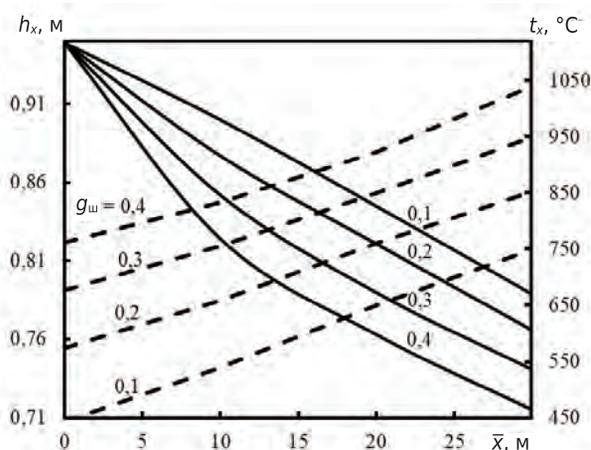
В развитии теории взаимодействия струи с расплавом выдающуюся роль сыграли многие исследователи (И. Г. Казанцев, Л. М. Ефимов, Е. Д. Хмелевская, Б. Л. Марков, В. И. Баптизманский и другие). Однако в настоящее время в кислородно-конвертерном процессе успешно развиваются и другие технологии взаимодействия нереагирующих струй с расплавом. Например, использование технологии раздува конечного шлака позволяет увеличить стойкость футеровки примерно в 10 раз. По современным представлениям считается, что все истекающие струи всегда являются сверхзвуковыми нерасчетными. Последнее время эти струи являются и четырехфазными — вместе с азотом вдувается огнеупорный порошок, из полости конвертера — шлак и газ.

Цель исследования — численное моделирование заглупления сверхзвуковой нерасчетной газопорошковой струи в шлаковый расплав с учетом диссипативных процессов в ударных волнах и скачках уплотнения, а также присоединение струй конвертерного газа со шлаком с разной температурой.

Математическая модель включает примерно 50 уравнений, которые решаются совместно и позволяют учесть температуру несущего газа  $t_0$ , концентрацию порошка  $\mu$ , присоединенную массу газа  $g$ , присоединенную массу шлака  $g_{ш}$ , температуру в полости конвертера  $t_r$ , коэффициенты  $\psi$  отставания частиц порошка от несущего газа и шлака  $\psi_{ш}$ , отношение диаметров сопла  $D_1/D_{кр}$ , степень нерасчетности  $n$ , давление торможения  $p_0$ . Расчетными параметрами газопорошковой струи являются присоединенная масса  $g$ , скорость  $w_{12}$ , плотность  $\rho_{12}$ , мощность  $N_{12}$  в выходном сечении сопла, а также параметры в произвольном сечении струи  $xx$ .

В качестве примера на рисунке показано, что присоединение шлака к струе тормозит ее и глубина внедрения струи  $h_x$  с увеличением  $g_{ш}$  снижается. Расчеты по-

казали, что, например, если  $g_{ш}$  увеличивается от 0,1 до 0,4, то на расстоянии  $x = 25$  глубина  $h_x$  проникновения струи в расплав уменьшается от 0,82 до 0,72 м. Глубину проникновения четырехфазной струи в шлак (сечение  $xx$ ) рассчитывали, используя уравнения для определения импульса  $I_x$ , скорости газопорошковой струи  $w_x$ , присоединенной массы  $g$  из полости конвертера и степени нерасчетности  $n$ . При этом задавались параметрами, которые указаны в исходных данных рисунка. Использование модели позволяет рассчитать параметры струи в произвольном сечении  $xx$ : температуру  $t_x$ , плотность  $\rho_x$ , скорость  $w_x$ , мощность  $N_x$ , импульс  $I_x$ , заглупление в расплав  $h_x$ , диаметр лунки  $D_x$ . Это представляет большой научно-технический интерес при освоении технологии раздува шлака в кислородном конвертере.



Влияние  $g_{ш}$  на  $h_x$  (—) и изменение  $t_x$  (- - -) по длине струи  $x$  при разном значении  $g_{ш}$ . Исходные данные:  $\mu = 0,3$  кг/кг;  $\Psi = 0,8$ ;  $\Psi_{ш} = 0,8$ ;  $V_n = 100$  м<sup>3</sup>/мин;  $d_{кр} = 32$  мм;  $d_1 = 49$  мм;  $m_2 = 37,5$  кг/мин;  $\rho_n = 1,25$  кг/м<sup>3</sup>

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: dva\_vadjik1975@mail.ru**КАРБИДКРЕМНИЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ  
КЕРАМИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ**

© С. В. Зайцев, к. т. н. Е. А. Дороганов, к. т. н. В. А. Дороганов (✉)

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова»,  
кафедра технологии стекла и керамики, Белгород, Россия

При комплексном воздействии высоких температур, химически агрессивных сред, эрозии твердыми частицами и электрическим током известные материалы во многих случаях не могут обеспечить долговечность конструкций, из которых они изготовлены. Среди неметалли-

ческих тугоплавких соединений, являющихся основой обширного класса материалов со специальными физическими свойствами, видное место занимает карбид кремния. Из-за своей высокой механической прочности и абразивоустойчивости в широком интервале темпера-

тур SiC получил большое распространение при производстве карбидкремниевых огнеупоров. Эти огнеупоры характеризуются улучшенными физико-механическими свойствами и долговечностью, а также небольшой усадкой, повышенной механической прочностью, сопротивлением деформации при высокой температуре, обусловленным отсутствием полиморфных превращений, малым ТКЛР и высокой теплопроводностью. Карбидкремниевые огнеупоры в основном изготавливают из зернистых полусухих или пластичных масс методами прессования, трамбования или протяжки. Один из перспективных методов их получения — керамобетонная технология на основе искусственных керамических вяжущих (ИКВ) карбида кремния.

В качестве исходных материалов для получения карбидкремниевых огнеупоров использовали полидисперсный порошок черного карбида кремния (заполнитель) и ИКВ на основе SiC (вяжущее), характеризующееся тиксотропно-дилатантным характером течения, плотностью 2400–2450 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 16–17 %. При формовании образцов использовали методы литья и пластический, а также статический метод прессования с последующим обжигом при 1300 °С. При использовании метода литья образцы получали из формовочных масс, состоящих из 15–30 % полидисперсного заполнителя и 70–85 % ИКВ карбида кремния. После термообработки образцов из анализа их основных физико-механических характеристик были выявлены

оптимальные составы, которые характеризовались открытой пористостью 21–22 %, кажущейся плотностью 2300–2400 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии 50–60 МПа. При переходе от способа литья к статическому удалось увеличить количество заполнителя до 40–70 %, а содержание вяжущего снизить до 30–60. После обжига образцы оптимального состава обладали улучшенными физико-механическими характеристиками по сравнению с образцами, полученными методом литья: открытая пористость 18–20 %, кажущаяся плотность 2400–2500 кг/м<sup>3</sup> и предел прочности при сжатии 70–80 МПа. При использовании пластического метода формования образцов их состав содержал 50 % заполнителя, 10–40 % ИКВ SiC; для придания пластических свойств в формовочную массу вводили 10–50 % огнеупорной глины. Анализ основных физико-механических характеристик образцов после обжига выявил наилучшие составы, которые характеризовались открытой пористостью 20–22 %, кажущейся плотностью 2300–2350 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности при сжатии 45–55 МПа.

Таким образом, установлена возможность получения различными способами формования композиционных материалов на основе карбида кремния с использованием ИКВ при температуре обжига не выше 1300 °С в окислительной среде.

\*\*\*

Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРСТОЙКОГО ШАМОТНОГО БЕТОНА СО СТОЙКИМ К ЩЕЛОЧНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ ЗАЩИТНЫМ СЛОЕМ

(✉)

E-mail: rimvydas.stonys@vgtu.lt

© П. Зданявичус<sup>1</sup>, д. т. н. В. Антонович<sup>1</sup>, д. т. н. Я. Щерба<sup>2</sup>, д. т. н. Р. Стонис<sup>1</sup> (✉), д. т. н. Р. Борис<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Вильнюс, Литва

<sup>2</sup> AGH «Научно-технический университет», Краков, Польша

В работе исследовали среднецементный жаростойкий бетон с шамотными заполнителями и добавкой на основе SiO<sub>2</sub>. Установлено, что щелочная стойкость такого бетона, определенная методом тигля, более 20 циклов. Результаты исследований показали, что образовавшийся при высоких температурах в ре-

зультате взаимодействия солей щелочи (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) с бетоном поверхностный защитный слой эффективен в диапазоне 1000–1200 °С. СЭМ- и ЭДС-исследования показали, что толщина слоя составляет около 900 мкм, в нем равномерно распределены калий (~24,5 %), силиций (~15,0 %) и алюминий (~18,5 %).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СУШКИ И ОБЖИГА ПОРИСТЫХ ВОЛОКНИСТО-АРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ

(✉)

E-mail: zroman7777@mail.ru

© К. т. н. Р. В. Зубащенко (✉), Н. В. Бувайлик, А. И. Новиков

ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия

Для производства широко применяемых алюмосиликатных теплоизоляционных изделий используют метод введения выгорающих добавок или пенометод. Свойства этих изделий соответствуют требованиям ГОСТ 5040–2015, в котором изделия, имеющие волокнистое строение, отсутствуют. Однако известно, что такие материалы обладают высокой термостойкостью.

В данной работе оптимизировали процесс сушки и обжига сырца, представляющего систему пористый корундовый заполнитель – алюмосиликатное стекловолокно – глина, в которой волокна упрочнены неорганической связкой (огнеупорная глина), незначительно снижающей пористость и тепловое сопротивление волокнистого материала (пат. 2643375 РФ). Сырец формовали методом вибропрессования

и термообработывали в промышленных условиях в туннельном сушиле и малогабаритной туннельной печи. Определяли зависимость остаточной влажности сырца от периодичности проталкивания вагонеток и температуры сушки, а также зависимость физико-химических свойств от режима обжига продукции.

Оптимизацию режима обжига проводили, опираясь на лабораторные данные кинетики спекания материала. В результате был подобран оптимальный график сушки и обжига, разработана схема садки сырца, установлены оптимальные температурный и гидравлический режимы работы тепловых агрегатов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### КОРУНДОВЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ И ПОРИСТЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ КОРУНДОВОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО

(✉)  
E-mail: zroman7777@mail.ru

© К. т. н. **Р. В. Зубащенко** (✉), **В. И. Кузин**  
ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия

ЗАО «ПКФ «НК» освоило производство целого ряда алюмосиликатных и корундовых теплоизоляционных изделий. Разработанные изделия имеют низкую и длительно не меняющуюся теплопроводность, достаточную механическую прочность, необходимую огнеупорность и характеризуются постоянством свойств при высоких температурах. К наиболее высокотемпературным из них можно отнести корундовые теплоизоляционные изделия марок КТ-1,1 и КТ-1,3 (ГОСТ 5040–2015).

Известно, что в традиционной технологии производства корундовых легковесных изделий сырьем служат глинозем, мел и опилки. Изделия формуют методом литья, сушат и обжигают при 1480–1540 °С. Корундовые легковесные изделия в ЗАО «ПКФ «НК» производят методом выгорающих добавок на основе гидравлического вяжущего. Фазовый состав выпускаемых легковесных изделий аналогичен составу тра-

диционных изделий и представлен корундом, а также гексаалюминатом кальция. Свойства выпускаемых легковесных изделий не уступают свойствам изделий, которые производят по традиционной технологии, и соответствуют требованиям ГОСТ 5040–2015. Технология характеризуется низким уровнем брака.

Производимые ЗАО «ПКФ «НК» изделия достаточно широко применяются в металлургической промышленности. В частности, корундовые теплоизоляционные изделия КТ-1,1 поставляются с 2008 г. для футеровки арматурного слоя вакуум-камер и установок металлизации цеха окомкования и металлизации ОЭМК. Изделия марки КТ-1,3 поставляются на НЛМК. Эти изделия использовали также для футеровки безмуфельной электрической печи Металлургического завода «Электросталь». Кроме того, теплоизоляционный материал применяют в качестве пористого заполнителя.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ВИБРОПРЕССОВАНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ВОЛОКНИСТО-АРМИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЙ

(✉)  
E-mail: zroman7777@mail.ru

© К. т. н. **Р. В. Зубащенко**<sup>1</sup> (✉), **М. А. Павлюшин**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия

<sup>2</sup> ЗАО «Теплохиммонтаж», г. Старый Оскол, Россия

В настоящее время в качестве теплоизоляционных материалов для футеровки тепловых агрегатов широко применяют изделия на основе муллитокремнеземистого стекловолокна, обладающие улучшенными теплоизоляционными свойствами. Такие изделия удобно применять в виде матов, плит, штучных изделий и др. Однако они характеризуются малой механической прочностью. Прочные изделия на основе муллитокремнеземистого волокна могут быть получены методом вибропрессования с последующим обжигом сырца. Известно, что волокна могут образовывать высокопористые композиции, в которых они упрочнены огнеупорной глиной, незначительно снижающей пористость и тепловое сопротивление волокнистого материала. В эту массу добавляли пористый наполнитель корундового состава. Структура с огнеупорным наполнителем благоприятна с точки зрения усадочных процессов при воздействии высоких температур. Из-за трудностей получения однородного материала при сухом смешивании использовали шликерную технологию, основанную на шликерной

пропитке муллитокремнеземистого стекловолокна. Термостойкость таких изделий кратно превышает термостойкость, например, ячеистой корундовой керамики.

Исследуемые изделия обжигали при 1500 °С. Такие изделия, несмотря на кристаллизацию волокон при обжиге, имели максимальную температуру эксплуатации — до 1550 °С (остаточные изменения размеров менее 1 %). Получена зависимость свойств изделий от давления вибропрессования (при постоянных амплитуде, частоте и времени). Готовили образцы одинакового состава (содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 63 %) кажущейся плотностью 1,2, 1,3 и 1,4 г/см<sup>3</sup>. Их предел прочности при сжатии составил соответственно 3,7, 4,8 и 6,1 МПа. В исследуемых волокнисто-армированных материалах непрерывны как поры, так и твердая фаза. Известно, что теплопроводность легковесных изделий с непрерывной твердой фазой выше, чем у изделий с непрерывными порами при равной общей пористости. Их теплопроводность при средней температуре 650 °С составила 0,35, 0,39 и 0,45 Вт/(м·К) соответственно.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: iampstu@gmail.com**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ  
СЛЮДОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФТОРФЛОГОПИТА  
ДЛЯ ФУТЕРОВКИ МАГНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**© К. т. н. А. М. Игнатова (✉), М. В. Юдин, д. т. н. М. Н. Игнатов  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
кафедра сварочного производства, метрологии и технологии материалов, г. Пермь, Россия

В настоящее время мировая потребность в цветных металлах постоянно возрастает, в частности, растет спрос на магний и его сплавы. Однако увеличение объема выпуска магниевой продукции сдерживается потребностью частого ремонта и диагностики электролитического оборудования из-за быстрого износа футеровки. Альтернативой традиционным материалам для футеровки могут стать литые слюдокристаллические материалы на основе фторфлогопита, основные преимущества которых перед традиционными огнеупорами заключаются в наиболее длительном сроке службы и наименьшем взаимодействии с внутренней средой магниевых электролизеров; в совокупности эти преимущества обозначают как «терморасплавоустойчивость». Достижение максимального уровня терморасплавоустойчивости литых стеклокристаллических материалов на основе фторфлогопита обеспечивается достижением соотношения фторфлогопита и стеклофазы в его структуре, а также морфометрическими параметрами основных фторфлогопитовых пластинчатых структурных составляющих. Оптимальные соотношения и структурные параметры выявляли методами математического моделирования. В качестве структурной модели принято, что кристаллические составляющие образуют пластинчатые пакеты, на границе которых концентрируется стеклофаза, которая является связкой между пакетами и образует сетчатый каркас.

На примере деятельности одного из предприятий установлено, что для повышения терморасплавоустойчивости литого слюдокристаллического материала необходимо контролировать не только процесс получения расплава и его дальнейшее затвердевание и кристаллизацию, но и стадии подготовки сырьевых материалов. Ключевыми моментами являются химический и фазовый составы, дисперсность помола, а также параметры связующего, используемого для гранулирования сырья. Гранулирование со связующим предназначено для автоматизации и повышения производительности технологического процесса.

Сырье плавил в однофазной поворотной электродуговой печи с графитовыми кокилем и электродами. Важным аспектом технологии является то, что плавка

ведется в гарнисаже, образующемся за счет интенсивного водяного охлаждения корпуса печи. Отливки термообработывали в нагревательных камерных печах. Исследованы технологические режимы получения расплава и термообработки отливок. Полученные образцы литых слюдокристаллических материалов на основе фторфлогопита исследовали с применением оптической и растровой электронной микроскопии, а также рентгенофазового анализа. Установлен химический состав образцов для обеспечения терморасплавоустойчивости, мас. %: SiO<sub>2</sub> 39,00–41,10, TiO<sub>2</sub> 0,04–0,06, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9,00–9,70, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общ. 0,05–0,15, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> не более 0,01, Na<sub>2</sub>O 0,04–0,47, K<sub>2</sub>O 7,20–8,90, CaO 0,80–3,20, MgO 27,2–29,2, S (сульфидная) не более 0,01, SO<sub>2</sub> (сера сульфатная) 0,07–0,20, CO<sub>2</sub> 0,11–0,31, F 9,35–11,67. Расчетным методом установлен фазовый состав образцов, мас. %: фторфлогопит 86,7–89,9, сопутствующие фазы (орто- и клинопироксены, гумитовые минеральные фазы и плагиоклаз) 5,0–7,0, стеклофаза 5,1–7,2.

Установлено, что морфометрические характеристики структурных составляющих образцов изменяются по размеру, но при этом сохраняется пропорциональное строение составляющих, о чем свидетельствует стабильное значение коэффициента сферичности. Обнаружено, что суммарная пористость образца составляет 19,7 %. Все поры можно разделить на две группы: с площадью поверхности 4,45–0,001 и 0,87·10<sup>-3</sup>–0,45·10<sup>-3</sup> мм<sup>2</sup>. Более крупные поры относятся к открытой пористости, более мелкие к замкнутой. На долю замкнутой пористости приходится 15 %, а на долю открытой 4,7 %. Соотношение замкнутых и открытых пор определяет свойства литого слюдокристаллического материала на основе фторфлогопита.

Выявленные закономерности и новые свойства литых слюдокристаллических материалов на основе фторфлогопита позволяют использовать их в качестве материалов для футеровки магниевых электролизеров. Кроме того, благодаря универсальности установленных закономерностей их можно использовать при переработке безжелезистого природного и техногенного сырья для получения электроизоляционных, художественных и бытовых изделий.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: gulya-ka11@yandex.ru**ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ  
НА ДИНАМИКУ УПЛОТНЕНИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ SiC–AlN**© К. ф.-м. н. Г. Д. Кардашова (✉), д. ф.-м. н. Г. К. Сафаралиев  
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», г. Махачкала, Россия

Керамическая технология имеет важное значение для изготовления изделий электронной техники. Эта технология предполагает неограниченное разнообразие

составов и свойств материалов и вместе с тем большое сходство методов оформления деталей. Общим для всех керамических материалов является основная

технологическая операция — спекание вещества при температуре ниже его плавления.

Инновационной технологией консолидации порошковых материалов для получения конструкционной керамики признан метод электроимпульсного плазменного спекания (spark plasma sintering — SPS), преимуществом которого является совмещение в одной операции формования и спекания, что значительно сокращает как временные затраты, так и энергетические. С помощью импульсного электротока и так называемого «эффекта плазмы искрового разряда» (spark plasma effect) достигаются быстрый нагрев и малая продолжительность рабочего цикла. Это позволяет подавить рост зерен и получить равновесное состояние, что открывает возможности для создания новых материалов с ранее недостижимыми составами и свойствами.

Цель исследований — определение оптимальных температуры и длительности SPS, а также состава исходных компонентов для получения высокоплотной керамики на основе карбида кремния. Образцы SiC–AlN получали при разных режимах SPS с введением в исходные смеси порошков дополнительно спекающей добавки  $Y_2O_3$ . Формование и спекание смеси порошков путем пропускания через заготовку электрического тока осуществлялись в пресс-формах внутренним диаметром 24 мм, изготовленных из изостатического графита И-3 (площадь 4,52 см<sup>2</sup>). Загрузка 10 г. Параметры SPS: температура 1400, 1500, 1600, 1700 и 1800 °С; давление прессования 50 МПа; длительность при рабочей температуре 3, 6, 9, 12 и 15 мин; атмосфера — вакуум (остаточное давление 0,5–0,1 Па).

С использованием известных технологических приемов получены опытные партии образцов трех составов: SiC(75 %)-AlN(25 %), SiC(75 %)-AlN(18 %)- $Y_2O_3$ (7 %) и SiC(75 %)-AlN(22 %)- $Y_2O_3$ (3 %). Установлено, что при спекании образцов состава SiC(75 %)-AlN(18 %)- $Y_2O_3$ (7 %) при 1800 °С в течение 6 мин в пресс-форме наблюдается формирование жидкой фазы, которая разъедает защитную графитовую фольгу и взаимодействует с матрицей пуансона, в результате чего происходит разрушение или растрескивание заготовки или ее частей. Основной способ решения этой проблемы — снижение длительности спекания, температуры или количества оксидной добавки. Поэтому в дальнейшем составы с содержанием  $Y_2O_3$  7 % были исключены из эксперимента. При подборе длительности спекания, влияющей на динамику уплотнения структуры и электрофизические свойства керамики, для двух составов решено было снять еще по три контрольные точки (9, 12 и 15 мин).

Плотность полученных образцов определяли методом заполнения и гидростатического взвешивания. Установлено, что наибольшую плотность (~95,9 % от теоретической) имели образцы состава SiC(75 %)-AlN(25 %), полученные SPS при 1800 °С в течение 15 мин, а при введении в состав 3 %  $Y_2O_3$  при тех же технологических параметрах достигается 100 %-ная плотность керамики. Таким образом, применение метода SPS обеспечивает получение высокоплотных керамических материалов при меньших энергетических и экономических затратах.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ДИАТОМИТА ИЛЬИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

(✉)

E-mail: i.a.pavlova@urfu.ru

© Д. т. н. И. Д. Кашеев, А. Э. Глызина, И. Р. Иштуганов, Н. Д. Ивачева, к. т. н. И. А. Павлова (✉)

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Установлена эффективность применения теплоизолирующей смеси (ТИС), изготовленной на основе диатомита Ильинского месторождения (Свердловская обл.), при плавке алюминия в лабораторных условиях. ТИС получали методом брикетирования природного диатомита с последующей термообработкой при 1000 °С. При испытании использовали фракцию 3–1 мм с насыпной плотностью 650 кг/м<sup>3</sup>.

Лабораторные исследования плавки технического алюминия проводили в кварцевом стакане объемом 250 см<sup>3</sup>. Металл нагревали в камерной печи до 880 °С, после чего тигель извлекали из печи и при помощи термопары, установленной непосредственно в расплав, измеряли температуру при охлаждении тигля в естественных условиях и определяли скорость охлаждения расплава. Длительность охлаждения металла от 880 до 200 °С составила 11 мин, причем на кривой охлаждения наблюдались три участка: от 880 до 660 °С практически линейный характер охлаждения со скоростью порядка 30 град/мин, при 660 °С кристал-

лизация металла в течение 2 мин, на третьем участке наблюдается резкое снижение температуры от 600 до 140 °С со скоростью 260 град/мин. При нанесении на поверхность расплавленного алюминия теплоизолирующего диатомитового материала фракции 3–1 мм слоем толщиной 25 мм кривая охлаждения металла заметно отличалась от предыдущей. При сохранении количества участков на кривой охлаждения временные промежутки значительно различаются. Так, на первом участке наблюдается линейный участок снижения температуры со скоростью охлаждения 22 град/мин, на втором, соответствующем температуре кристаллизации алюминия 660 °С, продолжительность составляла уже 8 мин, на третьем — наблюдается равномерное снижение температуры от 660 до 240 °С со скоростью порядка 18 град/мин.

Таким образом, установлено, что тепловая защита поверхности расплава алюминия слоем диатомитовой засыпки толщиной 25 мм позволила снизить скорость охлаждения металла на каждом из трех периодов кри-

вой охлаждения: на первом — от 30 до 22 °С/мин, на втором — увеличить время кристаллизации от 2 до 8 мин, на третьем снизить скорость охлаждения метал-

ла от 260 до 18 °С/мин. Скорость охлаждения алюминия без теплоизолирующей смеси гораздо выше, чем с ее применением.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

## ВСПЕНЕННАЯ КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА

(✉)  
E-mail: chemic@yandex.ru

© К. т. н. **В. В. Козлов** (✉)

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

Легковесные корундовые огнеупоры широко применяют в различных отраслях в качестве теплоизоляции, эксплуатируемой при высоких температурах, обычно выше 1400 °С. Современные легковесные неволоконистые высокотемпературные материалы получают с применением выгорающих добавок, микропористых заполнителей, полых микрогранул, а также методом подбора специального фракционного состава шихты или химического вспенивания корундового шликера.

В СПбГИ (ТУ) разработана технология синтеза легковесной теплоизоляционной корундовой керамики с формированием пористой структуры материала за счет применения органического вспенивающего агента, активирующегося при термообработке ко-

рундового шликера до 100–150 °С. При вспенивании объем шликера возрастает в 1,4–1,7 раза, формируется средне- и мелкопористая структура материала с порами преимущественно сферической формы.

Получен высокопористый и ультрапористый корундовый керамический материал (температура обжига 1400 °С) открытой пористостью 50–77 %, кажущейся плотностью 1,02–1,86 г/см<sup>3</sup> с пределом прочности при изгибе около 5 МПа, с усадкой при обжиге 3–6 % (1400 °С). Исследованы влияние концентрации вспенивающего агента и спекающей добавки, длительности выдержки корундового шликера на формирование пористой структуры материала, его расслаивание в процессе вспенивания и свойства получаемой легковесной корундовой керамики.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГОРЯЧИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

(✉)  
E-mail: konst@ntcbakor.ru

© Д. т. н. **Б. Л. Красный**<sup>1</sup>, к. т. н. **К. И. Иконников**<sup>1</sup> (✉), к. т. н. **Д. А. Серебрянский**<sup>1</sup>, к. т. н. **М. А. Вартанян**<sup>2</sup>, **О. И. Родимов**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НТЦ «Бакор», Москва, г. Щербинка, Россия

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

Наиболее эффективным способом очистки отходящих газов с температурой выше 450 °С является использование установок с проницаемыми керамическими материалами, позволяющими очищать отходящие газы до 99,9 % без предварительной подготовки, с возможностью последующей рекуперации тепловой энергии.

В НТЦ «Бакор» разработаны фильтровальные установки с импульсной регенерацией сжатым воздухом керамических фильтровальных элементов, которые состоят из связанных зерен карбида кремния и алюмосиликатного связующего. Необходимая пористость фильтров около 40 %, они должны обладать высокими механической прочностью, термической и химической стойкостью. Кроме того, эти материалы не должны иметь высокую температуру обжига для того, чтобы не допустить окисления зерен SiC и образования избыточного количества свободного диоксида кремния.

На основе вышеперечисленных требований в НТЦ «Бакор» были разработаны материалы на основе SiC и связующего муллитового и кордиеритового составов. Изделия изготавливали методом изостатического

прессования и обжигали в газовой печи периодического действия в интервале 1300–1360 °С.

Установлено, что наиболее перспективно создание фильтрующих элементов на керамическом связующем кордиеритового состава. Такие изделия обладают не только хорошими физико-механическими характеристиками (открытая пористость 38,2 %, плотность 1,84 г/см<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии 71,3, при диаметральном сжатии 22,4, при кольцевом сжатии 57,5 МПа), но и имеют крайне высокую термостойкость — более 75 теплосмен (950 °С – вода). В условиях импульсных регенераций холодным воздухом этот показатель является решающим для исключения аварийных остановок установки из-за разрушения фильтрующих элементов. Кроме того, НТЦ «Бакор» завершает ввод в эксплуатацию участка по производству волоконистых фильтрующих элементов длиной до 6 м на основе температуропрочных минеральных волокон. Это наряду с изготовлением разработанных изделий позволит применить индивидуальный подход к очистке дымовых газов разных источников, состава и температуры.

**ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ВЫСОКОПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ**

E-mail: dr.valerykuzin@yandex.ru

© Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**, к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

Поверхностный слой, сформированный на керамических изделиях при окончательной алмазной обработке, имеет весьма дефектную структуру, которая характеризуется значительно меньшей трещиностойкостью, чем исходная керамика. Это негативно влияет на эксплуатационные характеристики керамических изделий, особенно на этапе их приработки. Цель работы — разработать технологию лазерной структурной модификации дефектного поверхностного слоя на изделиях из высокоплотной керамики с формированием в нем периодических наноструктур и оценить эффективность этой технологии.

В результате экспериментального исследования воздействия непрерывного и импульсного лазерного излучения на поверхность высокоплотной керамики на основе  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и  $SiN$ , выполненного по оригинальной методике, вскрыта физическая основа процессов, происходящих в поверхностном слое высокоплотной керамики. Выявлены взаимосвязи мощности лазерного излучения, скорости и шага перемещения луча, частоты следования импульсов, числа импульсов в пачке, числа проходов в цикле обработки с морфологией, дефектностью, шероховатостью поверхности, размером и формой образующихся частиц, состоянием межзеренных границ, концентрацией, формой и размером пор, наплывов, кратеров и каверн в поверхностном слое высокоплотной керамики. С использованием этих взаимосвязей построена модель лазерной модификации структуры поверхностного слоя с образованием в нем периодических нано-

структур. В соответствии с этой моделью благоприятное изменение структуры поверхностного слоя в высокоплотной керамике происходит под действием экстремально высоких концентраторов напряжений, сформировавшихся в структурных элементах керамики под действием импульсного лазерного излучения, мощность которого изменяется в очень узком диапазоне. Детальное изучение этого эффекта показало возможность формирования поверхностного наноструктурированного слоя в высокоплотной керамике за счет изменения мощности последовательных лазерных импульсов в пачке по установленному закону. Эта возможность была реализована на практике за счет выявления технологических режимов лазерного воздействия, обеспечивающих реализацию этого физического эффекта.

Установлено, что трещиностойкость  $Al_2O_3$ -керамики,  $Al_2O_3$ -TiC-керамики,  $ZrO_2$ -керамики и  $Si_3N_4$ -TiC-керамики с наноструктурированным поверхностным слоем на 23, 19, 15 и 18 % соответственно выше, чем у исходной керамики. На износостойкость испытывали режущие пластины из  $Al_2O_3$ -TiC-керамики с наноструктурированным поверхностным слоем. Установлено, что средние значения стойкости режущих пластин с наноструктурированным поверхностным слоем на 18, 19 и 20 % выше, чем у исходных режущих пластин при использовании критериев их затупления 0,3, 0,4 и 0,5 мм соответственно. Результаты испытаний на надежность выявили более высокую стабильность керамических деталей с модифицированной поверхностью.

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПОЗИТЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

E-mail: dva\_vadjik1975@mail.ru

© **В. А. Локтионов**, к. т. н. **Е. А. Дороганов**, к. т. н. **В. А. Дороганов** (✉)

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», кафедра технологии стекла и керамики, Белгород, Россия

Кремнеземистые огнеупорные материалы на основе кварцевого стекла нашли широкое применение в промышленности из-за набора уникальных свойств (низкого ТКЛР, высоких огнеупорности и термостойкости и т. д.). Кварцевые композиционные изделия стараются получать по безобжиговой технологии для минимизирования полиморфных превращений при нагревании, что существенно продлевает срок их службы. Один из технологических подходов для получения безобжиговых кварцевых материалов — использование объемного, поверхностного или объемно-поверхностного модифицирования. Объемное модифицирование производится путем введения в структуру материала добавок, кото-

рые способствуют улучшению физико-механических характеристик без высокотемпературной обработки. Одним из способов поверхностного модифицирования является упрочнение химическим активированием контактных связей (УХАКС-механизм) путем выдержки полуфабриката в химически активном растворе с последующей сушкой или гидротермальной обработкой при атмосферном (пропарочная камера) или повышенном (автоклав) давлении.

В работе исследовано влияние разных способов модифицирования кварцевых систем на основные физико-технические характеристики материалов на их основе. В качестве исходного материала было выбрано

искусственное керамическое вяжущее (ИКВ) на основе аморфного кварцевого стекла. ИКВ получали мокрым помолом по технологии высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС). Исходные образцы ИКВ, полученные методом литья, после сушки характеризовались открытой пористостью 10–12 % и пределом прочности при сжатии 7–8 МПа. После поверхностного модифицирования по УХАКС-механизму путем пропитки в растворе натриевого жидкого стекла (плотность 1050 кг/м<sup>3</sup>) в течение 20 мин с последующей сушкой у образцов выявлены снижение открытой пористости до 6–8 % и повышение предела прочности при сжатии до 12–14 МПа. Объемное модифицирование образцов ИКВ проводили введением добавки 0,5 % нанодисперсного кремнезема Ludox марки HS. После сушки наблюдалось незначительное улучшение физико-механических свойств образцов по сравнению с исходными: открытая пористость 7–8 %, предел прочности при сжатии 10–11 МПа. Сочетание объемного и поверхностного модифицирования позволяет еще больше улучшить характеристики материала. Так, образцы на основе кварцевого ИКВ с добавкой нано-

дисперсного кремнезема после поверхностного модифицирования по УХАКС-механизму и сушки характеризовались открытой пористостью 5–6 % и пределом прочности при сжатии 18–20 МПа. Для изготовления композиционных материалов методом литья использовали составы с 30–50 % полифракционного заполнителя на основе кварцевого стекла и 50–70 % кварцевого ИКВ с 0,5 % Ludox марки HS. После сушки и упрочнения в растворе жидкого стекла с последующей сушкой открытая пористость образцов составляла 11–12 %, а предел прочности при сжатии 20–25 МПа.

Таким образом, в результате проведенных исследований показана высокая эффективность использования объемно-поверхностного модифицирования безобжиговых кварцевых систем, что позволяет снизить открытую пористость и увеличить механическую прочность материала в более чем 2 раза по сравнению с исходным составом.

\* \* \*

*Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В. Г. Шухова.*

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)  
E-mail: lukin.1938@mail.ru

## КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СЛУЖБЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

© Д. т. н. **Е. С. Лукин**<sup>1</sup> (✉), к. т. н. **Н. А. Попова**<sup>1</sup>, **С. М. Модин**<sup>2</sup>, к. т. н. **С. Н. Санникова**<sup>2</sup>,  
**А. А. Золотарев**<sup>2</sup>, **Д. С. Гладков**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «Композит» г. Королёв Московской обл., Россия

Огнеупоры из ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до настоящего времени остаются самыми широко применяемыми. Огнеупоры из ZrO<sub>2</sub> могут быть использованы до 2500 °С, из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — до 1800 °С. Одной из основных проблем в технологии термостойких и прочных огнеупоров из ZrO<sub>2</sub> является создание заданной структуры и фазового состава. Эта проблема решается по-разному. Основное направление — введение в состав керамики моноклинного ZrO<sub>2</sub>. При этом после обжига образуется микротрещиноватая структура, что приводит к повышению термостойкости, но прочность огнеупора при этом снижается.

Для разработки огнеупоров из ZrO<sub>2</sub> для ловушек атомных реакторов в качестве зернистого наполнителя использовали отходы прозрачных кристаллов фианита. Первоначально их подвергали дроблению, затем рассеву на фракции, которые использовали как зернистый наполнитель. В качестве дисперсной связки использовали также порошок частично стабилизированного ZrO<sub>2</sub>, который получали с применением гетерофазного химического осаждения. Шихта состояла из зерен фракций 2–1 и мельче 0,2 мм и порошка связки, включающего 7,5 мас. % стабилизированного и 7,5 мас. % частично стабилизированного ZrO<sub>2</sub>. Образцы формовали в виде цилиндров диаметром 50 и высотой 50 мм под давлением 200 МПа и обжигали при 1630 °С с выдержкой 5 ч. Плотность образцов 4,90 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость 16,2 %, предел прочности при сжатии

95 МПа. После десяти теплосмен (1200 °С – воздух) образцы не имели ни посечек, ни трещин; их прочность уменьшилась на 30 %. Применение непрерывного зернового состава (проход через сито с размером ячейки 2 мм) при том же содержании дисперсной связки позволило получить образцы, выдерживающие более 33 теплосмен (1200 °С – воздух), их прочность при этом уменьшилась на 20 %. Эти огнеупоры были разработаны для ловушек реакторов атомных станций. Специальная конструкция из этих огнеупоров прошла испытания в Курчатовском институте в присутствии расплава кориума при 2500 °С.

Перспективными для применения до 1800 °С остаются высокоплотные огнеупоры из электроплавленного корунда на корундошпинельной связке. В качестве зернистого наполнителя использовали белый электрокорунд фракций 2–1 и мельче 0,2 мм и 18 % связки из дисперсного α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15 мас. %) и MgO (3 мас. %). В процессе обжига изделий происходит взаимодействие MgO с дисперсным порошком Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с образованием алюмомагнезиальной шпинели, синтез которой идет с увеличением объема. В результате наблюдаются заполнение открытых пор и уменьшение общей открытой пористости. Достигнутая плотность образцов после обжига при 1700 °С 3,30–3,35 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость 10–12 %, предел прочности при сжатии 80–100 МПа.

Важная проблема — создание новых теплоизоляционных материалов взамен волокнистых из  $Al_2O_3$  для службы до 1800 °С. При таких температурах изделия из волокон  $Al_2O_3$  имеют ограниченный срок службы. Для использования в качестве теплоизоляционного материала были изготовлены изделия путем пропитки заготовок из пенополиуретана шликером, состоящим из дисперсного (3–5 мкм) порошка  $Al_2O_3$  с добавкой 0,3 % MgO и раствора ПВС. После сушки изделия обжигали в пламенной печи при 1750 °С. Полученные изделия пористостью 88–90 % с пределом прочности при сжатии до 2 МПа, теплопроводностью 0,3 Вт/(м·К) и температурой применения до 1800 °С использованы для теплоизоляции лабораторной печи с хромитлантановыми нагревателями на кафедре керамики в РХТУ им. Д. И. Менделеева. Футеровка печи при температуре службы при 1700 °С проработала в течение 10 лет без видимых разрушений. Футеровка из такой пористой керамики

на основе  $Al_2O_3$  оказалась очень эффективной для теплоизоляции вакуумных печей.

В настоящее время на кафедре керамики РХТУ им. Д. И. Менделеева разработана высокотемпературная керамика на основе SiC с добавками В и С. Беспористая керамика имеет предел прочности при сжатии 480 МПа, твердость 39 ГПа; окисление керамики при 1750 °С в воздушной среде в течение 100 ч отсутствует. Этот материал может быть с успехом использован в авиакосмической технике.

Перспективны для применения при конструировании печей беспламенные горелки. В настоящее время достигнута температура на керамических платах горелок 1250 °С. При использовании для беспламенных горелок диоксида циркония может быть достигнута температура 1500 °С. Горелки могут быть использованы также в печах особой конструкции для обжига керамических изделий. Особенности таких горелок — полное сгорание газа и эффективный равномерный нагрев изделий.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ BeO В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

(✉)

E-mail: alexander.malkin@urfu.ru

© А. И. Малкин<sup>1</sup> (✉), к. т. н. Н. С. Князев<sup>1</sup>, д. т. н. В. С. Кийко<sup>1</sup>, А. В. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

Для определения перспективных направлений применения материалов на основе BeO в СВЧ-области были исследованы их электродинамические характеристики в сантиметровой области длин волн при толщине образца 2 мм. Все измерения проводили методом линии передач с использованием математического аппарата NRW. В качестве измерительной линии использовали волноводную линию передачи стандарта WR90 с диапазоном частот от 8 до 12 ГГц. В ходе измерений вычисляли комплексное значение диэлектрической проницаемости образца в виде  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , где  $\epsilon'$  — действительная часть;  $\epsilon''$  — мнимая часть диэлектрической проницаемости.

В качестве опорного образца использовали образцы чистой (без примесей) BeO-керамики. Полученные значения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости BeO слабо зависят от частоты; при этом образец является изотропным. Значение действительной части диэлектрической проницаемости равно двум в исследуемом частотном диапазоне, вносимые потери близки к нулю. Исследованы также образцы BeO-керамики с добавками микро- и нанопорошков TiO<sub>2</sub> после спекания в восстановительной среде. При увеличении содержания добавки нанопорошка TiO<sub>2</sub> разброс значений  $\epsilon$  становится меньше; при этом средние значения действительной части диэлектрической проницаемости остаются на одинаковом уровне при концентрации нанопорошка до 1,5 мас. %. При увеличении содержания его до 2 мас. % происходят резкое снижение среднего значения диэлектрической проницаемости и возрастание стабильности измеренных значений в зависимости от частоты.

Измерены значения действительной части диэлектрической проницаемости в зависимости от направления распространения электромагнитной волны в образце. Измерительная установка на основе векторного анализатора цепей (Malkin, A. I., Knyazev, N. S. Dielectric permittivity and permeability measurement system) позволила осуществить эту процедуру без изменения ориентации образца в держателе. Установлено, что при смене направления распространения СВЧ-волны изменяется только коэффициент отражения. Это указывает на то, что причиной наблюдаемого эффекта могут быть поверхностные электростатические поля, наведенные в образце измерительным сигналом.

Таким образом, авторами впервые обнаружен эффект различия диэлектрической проницаемости чистой BeO-керамики и с добавкой TiO<sub>2</sub> при прохождении СВЧ-поля в прямом и обратном направлениях. Результаты исследования диэлектрической проницаемости керамики на основе BeO с добавками микро- и нанопорошков TiO<sub>2</sub> в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц показывают, что в образцах присутствует анизотропия, вызванная прохождением электромагнитной волны через материал. Повышение концентрации нанопорошка в керамических образцах снижает этот эффект, однако при этом следует учитывать, что действительная часть диэлектрической проницаемости также уменьшается. Установленный эффект, вероятно, связан с влиянием сильных электрических полей внутри и на поверхности микрорешетчатых сегнетопироэлектриков BeO и TiO<sub>2</sub>.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ  
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**(✉)  
E-mail: barca0688@mail.ru© К. т. н. **М. А. Марков** (✉), к. х. н. **А. В. Красиков, А. Н. Беляков, А. Д. Быкова**  
НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Москва, Россия

Решение проблемы коррозии является важной задачей при выборе материалов и назначении покрытий для конструкций, используемых в морской технике. В настоящее время для ответственных узлов морской техники, например гидравлических машин, используются хромовые покрытия. Их главной особенностью является возможность обеспечивать защиту как от коррозии, так и от износа при трении, что немаловажно для морских гидроцилиндров.

Механические повреждения хромовых покрытий часто оказывают негативное воздействие на работоспособность не только конкретной детали, но и всего судна в целом. При повреждении штоков гидроцилиндров манипуляторов или рулевых устройств, погруженных в морскую воду, происходят сопутствующее нарушение герметичности и обводнение цилиндра, что приводит к коррозии клапанов и прочей арматуры. Кроме того, механические повреждения хромовых покрытий вызывают интенсивную контактную коррозию основного металла в связи с разницей электрохимических потенциалов хрома и стали и значительным различием площадей поврежденной и неповрежденной зон покрытия. В итоге коррозия часто развивается по границе между хромом и сталью с последующим отслоением покрытия. Применение протекторных покрытий также не является решением проблемы, поскольку они не обеспечивают требуемых микротвердости и износостойкости. Усиление активной электрохимической защиты также нецелесообразно, так как оно приводит к образованию катодных отложений. Альтернативой этим подходам является комбинирование протекторного и износостойкого слоев покрытия.

Цель настоящей работы — разработка технологии нанесения износостойких коррозионно-стойких

двухслойных покрытий на сталь и проведение коррозионных испытаний. В результате проведенных исследований была создана технология, позволяющая формировать комбинированные покрытия, состоящие из протекторного слоя и внешнего защитного керамического слоя. Основой технологии является микродуговое окисление напыленного композиционного подслоя системы Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом напыленный подслоя окисляется не полностью и между керамикой и сталью сохраняется протекторный материал. Благодаря этому при развитии трещин из-за ударов композиционный протекторный слой предохраняет сталь от коррозии, в то время как трение происходит на поверхности керамики.

Полученное в итоге двухслойное покрытие обладает высокой микротвердостью (10–12 ГПа). Микротвердость композиционного подслоя благодаря высокой степени армирования составляет 2–3 ГПа. Для коррозионных испытаний были подготовлены образцы имитаторов штоков гидроцилиндров с керамическим слоем, полученным по двум режимам: при постоянно токовом и специально разработанном импульсном. Коррозионные испытания в камере соляного тумана при постоянном распылении и температуре 35 °С показали, что при экспозиции до 1000 ч изменений в образцах не наблюдается, что указывает на возможность применения разработанной технологии для гидравлических машин, функционирующих в морской воде.

\*\*\*

*Представленный материал получен в рамках реализации гранта Российского научного фонда (РНФ) № 18-73-00025.*

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**ВЫСОКООГНЕУПОРНАЯ ОСОБОПЛОТНАЯ КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА,  
ИЗГОТОВЛИВАЕМАЯ МЕТОДОМ ШЛИКЕРНОГО ЛИТЬЯ**(✉)  
E-mail:  
ukniiio@kharkov.ukrtel.net© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, к. т. н. **К. И. Куценко** (✉), к. т. н. **Ю. А. Крахмаль**,  
к. т. н. **Ю. Е. Мишнева**АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров им. А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана и внедрена технология получения корундовой керамики, которая широко применяется в различных областях науки и техники. Среди методов формования корундовых изделий значительное место занимает шликерное литье в гипсовые формы. В зависимости от толщины стенки и конфигурации изделия применяют два способа шликерного литья: сливной и наливной. Сливным способом отливают полые изделия в виде тиглей, чехлов, труб, кювет, лодочек и других изделий с толщиной стенки 1–3 мм, наливным — изделия сложной конфигу-

рации, изоляторы, стержни, пластины, ступки и пестики, а также изделия с толщиной стенки 4–5 мм и более.

Известно, что структура и свойства корундовой керамики во многом зависят от температуры и режима обжига. Поэтому для совершенствования технологии получения корундовой керамики методом шликерного литья в гипсовые формы исследовано влияние параметров длительного и быстрого режимов обжига (скорость подъема температуры, длительность выдержки) на ее спекание. Установлено, что длительный режим обжига обеспечивает полу-

чение корундовой керамики с более высокими значениями кажущейся плотности, а также влияет на ее структуру. По данным петрографических исследований, структура корундовой керамики, обожженной по длительному режиму, складывается более крупными плотноспеченными зернами  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В результате проведенных исследований усовершенствована технология получения высокоогнеупорной особоплотной корундовой керамики. Изделия, по-

лученные сливным и наливным способами из водных глиноземистых шликеров, характеризуются высокими показателями (средние значения): массовая доля  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,86 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,02 %,  $\text{SiO}_2$  0,03 %,  $\text{MgO}$  0,05 %,  $\text{Na}_2\text{O}$  0,02 %; открытая пористость 0 %, кажущаяся плотность 3,93 г/см<sup>3</sup>, предел прочности при изгибе 340 МПа, термостойкость ( $\Delta t_{\text{кр}}$ ) 160 °С, остаточные изменения размеров при нагреве (1800 °С) 0 %.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

✉  
E-mail:  
ukmiio@kharkov.ukrtel.net

### **КАРБИДКРЕМНИЕВЫЙ ОГНЕУПОР ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ НА НИТРИДКРЕМНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СВЯЗКЕ**

© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, д. т. н. **В. В. Примаченко**, к. т. н. **Л. А. Бабкина**, к. т. н. **Л. К. Савина** ✉,  
**Л. М. Щербак**, **А. С. Тинигин**

АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

Карбидкремниевые огнеупоры на нитридкремниевой связке, получаемые реакционным спеканием в среде газообразного азота, по ряду свойств (механической прочности, абразивоустойчивости, термостойкости, теплопроводности, стойкости к воздействию расплавов шлака и цветных металлов) широко применяются на предприятиях машиностроительной, химической и металлургической промышленности

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология изготовления прессованных карбидкремниевых изделий толщиной более 50 мм на нитридкремнийсодержащей связке с использованием углеродсодержащей добавки. Использование углеродсодержащей добавки в составе шихты огнеупора в процессе реакционного спекания способствует получению равномерной структуры материала по всей

толщине изделий и образованию связки многофазового состава, представленной  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\beta$ -сиалоном,  $\beta$ - $\text{SiC}$ ,  $\text{AlN}$ , что обеспечивает увеличение прочности огнеупора примерно на 10 %.

Карбидкремниевый огнеупор на нитридкремнийсодержащей связке характеризуется следующими показателями: массовая доля  $\text{SiC}$  более 70,0 %,  $\text{Si}_{\text{ост}}$  менее 0,5 %, N более 7,0 %; предел прочности при сжатии более 200,0 МПа, открытая пористость менее 18 %, кажущаяся плотность более 2,58 г/см<sup>3</sup>, температура деформации под нагрузкой 0,2 Н/мм<sup>2</sup> выше 1700 °С. Огнеупор рекомендуется для службы в экстремальных условиях (воздействие высоких температур, химически агрессивных сред, восстановительной среды, расплавов шлака, стекла, абразивного износа и др.).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

✉  
E-mail:  
ukmiio@kharkov.ukrtel.net

### **БЕСЦЕМЕНТНАЯ БЕТОННАЯ СМЕСЬ ОСНОВНОГО СОСТАВА**

© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, д. т. н. **В. В. Примаченко**, к. т. н. **Л. А. Бабкина**,  
к. т. н. **И. В. Хончик** ✉, **Л. Н. Никулина**

АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

Проведены исследования зависимости свойств бесцементной бетонной смеси основного состава от вида магнезиального заполнителя, кремнеземсодержащей добавки и диспергатора. В результате проведенных исследований разработаны состав и технологические параметры получения бетонной смеси и изделий на ее основе. Установлена возможность применения в качестве магнезиального заполнителя лома периклазовых изделий, кремнеземсодержащей добавки — пылевидного кварца, диспергирующих добавок — полимера на основе полиэтиленгликоля, кремнеземсодержащего материала с размерами частиц менее 2 мкм и 10 %-ной водной суспензии с pH = 6, химической фосфатной связки. Установлены оптимальные температуры термообработки безобжиговых изделий (350 °С) и обо-

жженных (~ 1450 °С), а также возможная температура применения обожженных изделий (1580 °С и выше).

Бесцементная периклазовая бетонная смесь характеризуется следующими показателями: массовая доля  $\text{MgO}$  не менее 89 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  не более 1,5 %; зерновой состав — менее 6 мм; предел прочности при сжатии образцов бетона после термообработки при 350 и 1450 °С (5 ч) 30 и 80 Н/мм<sup>2</sup> соответственно, остаточные изменения размеров при нагреве (усадка) при 1580 °С (2 ч) не более 1 %, огнеупорность выше 1780 °С. Разработанная бетонная смесь рекомендуется для монолитной футеровки высокотемпературных агрегатов черной и цветной металлургии, производства ферросплавов и цементной промышленности, а также для изготовления изделий сложной конфигурации и бетонных блоков.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ✉  
E-mail:  
ukmiio@kharkov.ukrtel.net**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКООГНЕУПОРНЫХ  
КОРУНДООКСИДЦИРКОНИЙСИЛИКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ДЛЯ ПЕЧЕЙ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВОЛОКНА**© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, д. т. н. **В. В. Примаченко**, к. т. н. **И. Г. Шулик**,  
к. т. н. **Ю. Е. Мишнева** ✉, к. т. н. **К. И. Кущенко**, к. т. н. **Ю. А. Крахмаль**АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

Для футеровки бассейна, фидера и верхнего строения стекловаренных печей производства стекловолокна из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла Е и С и базальта применяют высокоогнеупорные изделия, способные длительное время противостоять коррозионному и эрозионному воздействиям компонентов шихты и агрессивных стекольных и базальтовых расплавов. В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология и на протяжении ряда лет производятся хромоксидные, корундооксидцирконийсиликатные, корундохромоксидцирконийсиликатные и корундохромоксидные огнеупоры для стекловаренных печей производства стекловолокна, обеспечивающие непрерывную кампанию печей в течение 7–7,5 года. Эти огнеупоры неоднократно поставлялись на предприятия, производящие стекловолокно, в Российскую Федерацию, Республику Беларусь, Латвию.

Для совершенствования технологии корундооксидцирконийсиликатных огнеупоров провели исследование оптимизации фракционного состава зернистой части шихты, а также влияния влажности массы и давления ее прессования на кажущуюся плотность сырца и основные показатели свойств обожженных образцов. Установлены оптимальные технологические параметры, позволяющие повысить эффективность использования сырьевого материала — электроплавленного корунда, получить сырец кажущейся плотностью 2,96–3,00 г/см<sup>3</sup>, а также следующие показатели корундооксидцирконийсиликатных огнеупоров: кажущаяся плотность 3,1–3,2 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость 20–21 %, предел прочности при сжатии 75–100 МПа, дополнительная усадка при 1650 °С и выдержке 2 ч менее 0,1 %, термостойкость (950 °С – вода) более 20 теплосмен.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ✉  
E-mail: nekrasova-ok@yandex.ru**МУЛЛИТОВЫЕ ОГНЕУПОРЫ С НАНОДИСПЕРСНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ  
И ДЕФЛОКУЛЯНТАМИ**© **О. К. Некрасова** ✉, д. т. н. **А. С. Брыков**, к. т. н. **М. Е. Воронков**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических  
и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

Бетоны на муллитовом заполнителе вследствие своих характеристик имеют важное значение в промышленных металлургических процессах. Наилучшим образом потенциал муллитовых огнеупоров может быть использован при условии, чтобы и матричное вещество (связка), а не только заполнитель, было сформировано преимущественно муллитом и не содержало бы менее тугоплавких фаз. Один из возможных способов синтеза муллитовой матрицы заключается в использовании компонентов, образующих муллит при высокотемпературном обжиге, например высокодисперсных форм глинозема (реактивный глинозем) и SiO<sub>2</sub>. В качестве высокодисперсного кремнезема наиболее удобно для этих целей использовать его стабилизированные водные дисперсии (золи SiO<sub>2</sub>), выпускаемые промышленностью в широком ассортименте. Такая дисперсия, позволяющая обеспечить равномерное распределение частиц SiO<sub>2</sub> в бетонной смеси, представляет собой одновременно и готовое связующее, и высокоактивный компонент при образовании муллита.

В состав композиций с высокодисперсными компонентами необходимо вводить эффективные дефлокулянты, препятствующие агрегации мельчайших частиц, обеспечивающие равномерное их распределение

в бетонной смеси и компенсирующие таким образом загущающий эффект, вызываемый такими частицами. Однако подбор подходящего дефлокулянта для бесцементных огнеупорных композиций, имеющих низкую водопотребность и содержащих заряженные частицы SiO<sub>2</sub> коллоидных размеров, представляет собой не вполне решенную задачу, поскольку традиционные пластифицирующие вещества (поликарбоксилатные эфиры, лимонная кислота, триполифосфат натрия) в этих условиях оказываются недостаточно эффективными разжижителями. Между тем было установлено (Воронков М. Е., Брыков А. С., Некрасова О. К., Павлов С. С. Влияние пирокатехина на свойства бесцементных огнеупорных бетонных смесей на основе кремнезема-содержащих коллоидных связующих. Новые огнеупоры. 2018. № 10. С. 49–52), что в системах, близких к рассматриваемым в данном исследовании, дефлокулирующие свойства проявляет пирокатехин (1,2-дигидроксибензол), эффективность которого становится заметной уже при дозировках порядка тысячных долей процента; приведено обоснование эффективности пирокатехина.

В данной работе исследовали действие пирокатехина в качестве дефлокулянта в составе огнеупор-

ных бесцементных масс, содержащих муллитовый наполнитель (<3 мм), корунд (<0,063 мм), реактивный  $Al_2O_3$ , микрокремнезем и коллоидную дисперсию  $SiO_2$ , стабилизированную ионом  $NH_4^+$ . Для сравнения был использован также традиционный дефлокулянт триполифосфат натрия (ТПФ). Определяли исходную растекаемость бетонной массы и ее растекаемость после 30 встряхиваний, прочность (при сжатии и изгибе) и фазовый состав образцов после обжига. Установлено, что пирокатехин в дозировке 0,005 мас. %, в 20 раз меньшей, чем дозировка ТПФ, по сравнению с последним обеспечивает лучший пластифицирующий эффект

(исходная растекаемость 106, 133 и 122 мм соответственно для контрольной смеси и смесей с добавками пирокатехина и триполифосфата натрия; значения растекаемости после 30 встряхиваний соответственно 133, 175, 160 мм) и не снижает прочность образцов. ТПФ, оказывая вначале пластифицирующее действие, приводит к преждевременному схватыванию массы. По данным рентгенофазового анализа и электронной микроскопии, материал матрицы всех образцов после обжига при 1400 °С практически идентичен и состоит из муллита и корунда. Кремнезем из связующего и микрокремнезема полностью входит в состав муллита.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

**ОГНЕУПОРНЫЙ КАПСЕЛЬ ДЛЯ ОБЖИГА АЛЮМОНИТРИДНЫХ ПОДЛОЖЕК**

(✉)  
E-mail: PletnevPM@stu.ru

© К. Т. н. Ю. К. Непочатов<sup>1</sup>, д. т. н. П. М. Плетнев<sup>2</sup> (✉), А. А. Денисова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «НЭВЗ-Керамикс», г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск, Россия

Высокотемпературный обжиг алюмонитридных подложек проводится в восстановительной среде при 1800–1850 °С, при этом огнеупорная оснастка изготавливается из нитрида бора. Конструкция оснастки (капселя) значительно определяет качество и выход годных изделий. Для обеспечения повышенной плоскостности, устойчивости обжигаемых подложек, защиты изделий от воздействия газовой среды (углерода, серы), повышения заполняемости объема капселя изделиями предложен и реализован на практике капсель из нитрида бора оригинальной конструкции. Капсель состоит из корпуса в виде короба прямоугольного сечения и днища, соединенных между собой с зазором, заполненным жаропрочным порошком, а также разделительных пластин, установленных параллельно друг другу и поверхности днища капселя. Пластины выполнены с опорами, имеющими форму прямоугольного параллелепипеда различной высоты для обеспечения требуемых промежутков между разделительными пластинами, на которых размещаются спекаемые изделия. Соединение между корпусом и днищем выполнено в

виде разъемного замкового соединения Г-образной или П-образной формы. Замковое соединение образовано выступающим центральным элементом на днище, взаимодействующим с боковыми стенками короба, либо выполнено по типу «шип-паз».

Загрузку обжигаемых изделий в капсель осуществляют следующим образом: на днище помещают подложки, собранные в один или несколько слоев, затем устанавливают разделительную пластину с опорами, на которую помещают следующую партию изделий и т. д. Таким образом, собирают этажерку из разделительных пластин и изделий по высоте, равной высоте корпуса капселя. В замковое соединение между корпусом и днищем засыпают жаропрочный мелкодисперсный порошок. Собранный этажерку с изделиями плотно накрывают корпусом капселя и загружают в графитовую печь на обжиг в заданном режиме. Разработанное устройство-капсель позволяет повысить производительность огнеупорной оснастки и качество спекаемой продукции с повышением выхода годных изделий.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ С ДОБАВКОЙ НАНОЧАСТИЦ  $TiO_2$** 

(✉)  
E-mail: v.kijko@mail.ru

© А. В. Павлов<sup>1</sup>, А. А. Лепешев<sup>1</sup>, А. И. Малкин<sup>2</sup>, д. т. н. В. С. Кийко<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Разработана технология получения керамики на основе оксида бериллия с добавкой микро- (28,0–30,0 мас. %) и нанокристаллических (0,1–2,0 мас. %) порошков  $TiO_2$ . Наночастицы в состав шихты вводили при помощи специально разработанного реактора импеллерного типа в дистиллированной воде в условиях непрерывного барботирования сжатым воздухом. Экспериментальная установка представляет

собой цилиндрическую вертикально расположенную емкость из нержавеющей стали на жестком основании, внутри которой установлен вал с лопастями, в процессе вращения которого происходит перемешивание шихты. Заготовки формовали методом шликерного литья под давлением с использованием органической связки с последующим ее выжиганием и спекали при температурах 1520–1530 °С в форма-

кууме в графитовом тигле в печи с углеродным нагревателем.

При спекании керамики наночастицы  $TiO_2$  выталкиваются на поверхность микронных гранул (т. е. в межкристаллитные прослойки). Таким образом, проводимость идет по случайной сетке из прослоек между гранулами. Некоторые прослойки соседних гранул могут и не взаимодействовать между собой, отсюда появляются конечное сопротивление и прыжковый механизм проводимости от одной прослойки к другой (между прослойками). С ростом концентрации наночастиц  $TiO_2$  до 2,0 мас. % они начинают слипаться между собой или с микрочастицами уже внутри гранул и не выходят в межкристаллитные прослойки, вследствие чего материал становится диэлектриком.

Внутри гранул также может происходить смещение зарядов к противоположным границам гранул, что может приводить к возникновению внутрикластерного тока. Такое смещение зарядов может сопро-

вождаться появлением дополнительной поляризуемости керамики в ее объеме и ростом диэлектрической проницаемости преимущественно в области низких частот. Однако по мере возрастания частоты электрического поля заряды не успевают сместиться к границе кластеров и начинают отставать по фазе от внешнего поля. Это может приводить к возникновению сильных потерь действующего электромагнитного поля в СВЧ-области спектра. Такие потери называются релаксационными.

Электропроводность полученной керамики в диапазоне частот 10 Гц – 100 МГц изменяется в пределах  $7 \cdot 10^{-7} - 1,0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Плотность такой керамики, измеренная пикнометрическим методом, составляет 3,2–3,4 г/см<sup>3</sup>. Наблюдаемый немонотонный рост проводимости с возрастанием частоты объясняется появлением релаксационной компоненты тока, сопровождающейся увеличением диэлектрических потерь.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

✉

E-mail: katstivens@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛТСС-КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

© А. Ю. Павловец ✉, Д. Т. Н. И. Д. Кашеев, К. Т. Н. И. А. Павлова, В. В. Митракова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,  
кафедра химической технологии керамики и огнеупоров, Екатеринбург, Россия

В связи с обширным внедрением в различные устройства модулей связи и позиционирования — GPS, ГЛОНАС, Bluetooth, Wi-Fi и других, а также с увеличением мощностей вычислительной техники необходимы разработки композитов, позволяющих обеспечить выполнение всех функциональных требований к изделию. Для поддержания высоких частот необходима твердая изоляционная основа для изготовления печатных плат. Применение низкотемпературной совместно обжигаемой керамики «low temperature co-fired ceramics» (LTCC-керамики) позволяет сформировать многофункциональные изделия сложной конфигурации и конструкции с высокой теплопроводностью. На миниатюрной подложке из этой керамики необходимо разместить топологический рисунок схемы, при котором будет поддерживаться передача беспроводного сигнала на высоких частотах. Важным направлением в производстве микроэлектроники коммерческого и специального назначения является разработка новых составов и технологий производства изделий, получаемых синтезом керамических материалов при низких температурах путем совместного обжига. Данные технологии относятся по ряду пунктов к критическим технологиям РФ.

LTCC-керамика, как правило, основана на использовании многокомпонентной системы  $BaO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ , которая позволяет спекать LTCC-материал при температуре  $(900 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$ , а также исключить применение тугоплавких проводниковых паст и заменить их легкоплавкими проводниковыми составами на основе драгоценных металлов: серебра ( $T_{пл} 961 \text{ }^\circ\text{C}$ ), золота ( $T_{пл}$

$1064 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и др. Физические свойства стеклокерамических композитов (диэлектрические показатели, ТКЛР, механическая прочность и др.) зависят от свойств минеральных фаз, формирующихся в процессе спекания материала. В качестве легкоплавкого расплава в LTCC-керамике можно применять борат бария (система  $BaO-B_2O_3$ ) с низкой температурой плавления. Введение  $\alpha-Al_2O_3$  в шихту улучшает режим спекания LTCC-керамики и, соответственно, позволяет получить высокую механическую прочность. Введение  $SiO_2$  в состав шихты снижает диэлектрическую постоянную керамики.

В настоящее время в РФ применяется импортная LTCC-керамика, которая имеет ряд недостатков (срок годности, длительная поставка и др.).

В рамках грантовой программы «У.М.Н.И.К.» при поддержке Фонда содействия инновациям выполнены исследования LTCC-керамики марок FerroL8 и DuPont951 и определены оптимальные составы в многокомпонентной системе  $BaO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$  в качестве основы для изготовления LTCC-композита. Для этой цели исследованы 40 различных составов и установлен оптимальный состав 60Ba–30B–20Si. Температура плавления состава  $861 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует получению низкотемпературной керамики. Получение LTCC-керамики по предлагаемой технологии позволит уменьшить энергозатраты производства многослойных печатных плат со сложной конфигурацией и сократить затраты на приобретение импортного материала и технологии.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

✉

E-mail: vbdemidovich@mail.ru

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА И ОПТИМИЗАЦИИ ФУТЕРОВКИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ  
ДЛЯ ГРАФИТИЗАЦИИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА**

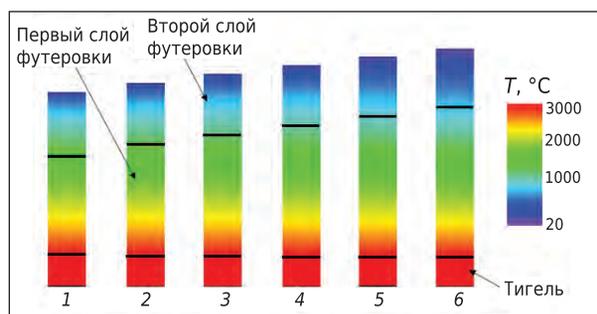
© Ю. Ю. Перевалов, В. Б. Демидович ✉, С. Ц. Жамбалова

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)»,  
Санкт-Петербург, Россия

Высокотемпературные нагревательные индукционные печи применяются для графитизации углеродного волокна в защитной атмосфере. Качество углеродного волокна, получаемого на выходе из проходной высокотемпературной нагревательной печи, зависит от процессов подогрева и последующей выдержки при высоких температурах (до 3000 °С), согласно заданному температурному режиму. Правильный выбор расположения, толщины и материала футеровки существенно влияет на распределение температурного поля в индукционных системах. Индукционные печи обладают повышенной надежностью и высокими энергетическими характеристиками, однако если с увеличением толщины футеровки электрический КПД уменьшается, то термический КПД, наоборот, растет. На рисунке показана диаграмма распределения температуры в двухслойной футеровке при различной толщине футеровки.

Разработана методика определения двух- и трехслойной футеровки из специальных материалов,

обеспечивающая максимально полный КПД и минимальные энергозатраты в проходной индукционной нагревательной печи для графитизации углеродного волокна в защитной атмосфере.



Температурное поле по толщине двухслойной футеровки при толщине первого слоя футеровки, мм: 1 — 80; 2 — 90; 3 — 100; 4 — 110; 5 — 120; 6 — 130. В каждом случае температура тигля 3000 °С, температура поверхности второй футеровки 20 °С

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

✉

E-mail: pva-vostio@bk.ru

**ВЛИЯНИЕ ФЛЮИДОВ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ НА КОНСТИТУЦИЮ  
ОБЖИГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ**© Д. Г.-М. н. В. А. Перепелицын<sup>1</sup> ✉, К. Т. н. К. Г. Земляной<sup>2</sup><sup>1</sup> ОАО «Динур», г. Первоуральск Свердловской обл., Россия<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

При производстве изделий в качестве временного связующего используют широкий ассортимент органических, органо-минеральных и неорганических соединений, содержащих кроме углеродородов силикаты, сульфаты, фосфаты, бораты и др. Продукты термообработки, окисления и разложения этих соединений в большинстве случаев обладают низкими температурой плавления и высокой упругостью пара. В интервале 700–1400 °С происходят окисление, разложение, плавление и испарение легкоплавких компонентов с образованием так называемых флюидов — смеси расплавов, паров и газообразных фаз. Ранее была установлена деградация ряда огнеупорных материалов под влиянием агрессивных флюидов при длительной термообработке или термическом старении в высокотемпературной туннельной печи. В настоящем сообщении изложены причины и механизм резкого уменьшения прочности (в 5–10 раз) ряда образцов материалов вследствие массообменных процессов между флюидами и обжигаемыми огнеупорами.

Объектами изучения были образцы огнеупорных материалов периклазового, корундового и циркониевого составов после длительных термоциклических испытаний при 1650–1700 °С в промышленной тун-

нельной печи. Для получения наиболее полной информации проведено комплексное материаловедческое исследование с использованием химического, рентгенофазового и петрографического анализов. Ниже приведены результаты исследования главных фазово-структурных превращений при «термостарении» корундовых (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 95–98 мас. %), периклазовых (MgO 98 мас. %) и циркониевых бетонных (на барийалюминатном цементе, ZrO<sub>2</sub> 94–95 мас. %) материалов.

По своей фазово-химической природе исследованные серии образцов разделяются на две группы: амфотерные (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>) и основные (MgO). Амфотерные оксиды проявляют высокую химическую активность к щелочам (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) с образованием соответствующих алюминатов с общей формулой R<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (где n = 5–11) и цирконатов Na<sub>2</sub>O·mZrO<sub>2</sub>. Корунд реагирует не только с парами щелочей. В связи с присутствием в печном пространстве также продуктов испарения и пыли MgO на поверхности корундовых материалов, включая газопроницаемые поры, синтезируется шпинель MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. В данном случае корунд ведет себя как кислотный оксид. Наиболее устойчивым ко всем флюидам туннельной печи является периклаз, в котором отсутствуют продукты хемосорб-

ции и взаимодействия со всеми флюидами печного пространства ( $R_2O$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$  и др.). Периклазовые материалы из плавящихся порошков практически не разупрочняются и не разрыхляются в процессе термического старения при многократном термоциклировании. В них не идут процессы рекристаллизации  $MgO$  и коалесценции пор. Корундовые и циркониевые бетоны в условиях многократного термоциклирования в туннельной печи интенсивно разрушаются за счет хемосорбции, взаимодействия с парообразными

корродиентами, пылью  $MgO$  и реакционного перерождения со значительным приростом объема (в сумме  $\Delta V \approx 35\%$ ). Результаты исследований процессов перерождения различных огнеупорных материалов в процессе термоциклирования в промышленной туннельной печи показали, что высокотемпературный обжиг изделий и керамики из чистых оксидов следует осуществлять с учетом состава садки, накопленных в футеровке и присутствующих в атмосфере теплового агрегата флюидов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail:  
ukmiiio@kharkov.ukrtel.net

### СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ КОРУНДОПЕРИКЛАЗОВОЙ ЗЕРНИСТОЙ МАССЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ КОМБИНАЦИЮ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ

© Д. т. н. **В. В. Примаченко**, к. т. н. **К. И. Кущенко** (✉), к. т. н. **Ю. А. Крахмаль**, **Л. П. Ткаченко**  
АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана и внедрена технология вибролитых тиглей различного состава для индукционной плавки жаропрочных сплавов. Так, для индукционной вакуумной и открытой плавки жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта при температурах до  $1800\text{ }^\circ\text{C}$  рекомендуются корундопериклазовые тигли, которые характеризуются высокой адсорбционной способностью пленки металлов. Известно, что изготовление вибролитых изделий с использованием в качестве сырьевого компонента периклаза связано с рядом технологических трудностей вследствие его активности к гидратации, причем при повышении температуры скорость гидратации увеличивается. Для снижения скорости гидратации применяют различные поверхностно-активные вещества и добавки. Поэтому для совершенствования технологии вибролитых корундопериклазовых тиглей исследовано влияние комбинации диспергирующих добавок двух типов на основе полиэтиленгликоля в количестве  $0,2\%$  на структурообразование корундопериклазовой массы.

В результате исследований растекаемости при вибрации корундопериклазовых масс влажностью  $4,0\text{--}5,5\%$  установлено, что с увеличением влажности их растекаемость увеличивается от  $120$  до  $210\%$  и даже при

минимальной влажности является достаточной для формования изделий методом вибролитья. Результаты исследований пластической прочности корундопериклазовых масс показали, что у масс влажностью  $4,0\%$  через  $3$  ч хранения наблюдается интенсификация процесса структурообразования, что обуславливает их низкую технологичность. У масс влажностью  $5,5\%$  с увеличением длительности хранения изменения пластической прочности незначительны, что свидетельствует об избыточном количестве воды в межзеренном пространстве. Таким образом, установлено, что при температуре окружающей среды ( $25 \pm 1$ )  $^\circ\text{C}$  оптимальная влажность массы составляет  $4,5\text{--}5,0\%$ , а длительность ее хранения до  $3$  ч; при этом растекаемость массы при вибрации составляет от  $140$  до  $170\%$ .

В результате проведенных исследований усовершенствована технология изготовления корундопериклазовых тиглей методом вибролитья, содержащих комбинацию диспергирующих добавок на основе полиэтиленгликоля. Изделия характеризуются высокими показателями (средние значения): массовая доля  $Al_2O_3$   $92,7\%$ ,  $MgO$   $6,1\%$ ,  $Fe_2O_3$   $0,17\%$ ; открытая пористость  $23,6\%$ , кажущаяся плотность  $3,00\text{ г/см}^3$ , предел прочности при сжатии  $43,5\text{ МПа}$ .

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail:  
ukmiiio@kharkov.ukrtel.net

### НИЗКОЦЕМЕНТНЫЙ КОРУНДОВЫЙ ХРОМСОДЕРЖАЩИЙ БЕТОН ДЛЯ СЛУЖБЫ В РЕАКТОРАХ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

© Д. т. н. **В. В. Примаченко**, к. т. н. **И. Г. Шулик**, к. т. н. **Т. Г. Гальченко** (✉)  
АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного»,  
г. Харьков, Украина

При выборе эффективных огнеупорных материалов для футеровки реакторов производства технического углерода, особенно ее рабочего слоя, учитывают специфику агрессивного воздействия на нее разрушающих факторов в процессе службы. Кроме того, выбор огнеупоров осложняется ограничениями толщины футеровки, жесткими условиями эксплуатации, а также необходимостью получения продукции высокого качества. К огнеупорным материалам, применяемым в

футеровке реакторов производства технического углерода, предъявляется ряд специальных требований. Они должны характеризоваться высокой химической стойкостью в восстановительной газовой среде, повышенной устойчивостью к корродирующему действию капель распыляемого углеводородного сырья и частиц образующегося технического углерода, а также эрозионной стойкостью к воздействию высокоскоростного ( $\sim 450\text{ м/с}$ ) газового потока.

Таковыми характеристиками обладает разработанный в АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» низкоцементный корундовый хромсодержащий бетон, новизна которого защищена патентами Украины. Этот бетон успешно эксплуатируется в футеровке промышленных реакторов на заводах технического углерода Украины при температуре службы в наиболее высокой зоне (камере горения) примерно 1850 °С, скорости газовых потоков около 450 м/с. Средняя стойкость футеровки реакторов, выполненной из этого бетона, не менее 1,5 года при максимальной

стойкости отдельных реакторов 2,5–3,0 года. Внедрение разработанного бетона обеспечило интенсификацию технологического процесса производства технического углерода (особенно его активных марок) и, как следствие, увеличение на 8–10 % выхода технического углерода, степени полезного использования углеводородного сырья (экономия ~ 15 %), производительности технологического оборудования из-за повышения примерно в 1,5–2,0 раза ресурса работоспособности футеровки и уменьшения внеплановых остановок реакторов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: festurvp@mail.ru

### МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ГАФНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОДА ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

© К. т. н. **В. П. Рева** (✉), **В. Ю. Ягофаров**, **А. А. Назаренко**, **В. А. Титова**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,

кафедра материаловедения и технологии материалов», г. Владивосток, Россия

Карбид гафния находит применение в качестве огнеупорных, жаропрочных и абразивных материалов, а также в твердых сплавах для улучшения его характеристик. Карбид гафния получали путем механохимического синтеза в системе Hf–C. Использовали порошок гафния марки ГФМ-1 дисперсностью  $\leq 50$  мкм и чистотой 98,7 %. В качестве углеродсодержащего сырья применяли возобновляемое растительное сырье: мох сфагнум магелланикум (*Sphagnum magellanicum*), а также листья и стебли кукурузы сорта Катерина СВ. Модификацию углерода с аморфной структурой как компонент для синтеза карбида гафния получали по пиролитической технологии при 950 °С. Далее аморфный углерод проходил химическую отмычку в кипящей смеси кислот (HCl + HNO<sub>3</sub>). Активацию исходных компонентов и механохимический синтез карбида гафния осуществляли в герметичном контейнере энергонапряженной вибромельницы, работающей при частоте колебаний контейнера 750 мин<sup>-1</sup> и амплитуде 90 мм. В качестве помольных тел использовали шары из стали ШХ-15 диаметром 15 мм. Фазовый состав порошковых продуктов определяли на дифрактометре D8 ADVANCE

(Bruker). Распределение частиц по размерам и гранулометрический состав устанавливали с помощью лазерного анализатора частиц Analysette 22 NanoTec/MikroTec/XT (Fritsch).

Наибольшей дисперсностью обладает порошок, полученный после 25 мин механоактивации смеси (Hf + C), при этом 80 % частиц карбида гафния имеет размер менее 0,5 мкм, а 45 % частиц менее 0,05 мкм. Исследование порошков карбида гафния, полученных после механической активации смеси (Hf + C) с использованием в качестве углеродного агента продуктов пиролиза растительного сырья, показало, что содержание серы в них составляло 0,0010–0,0014 %, в то время как в продуктах, полученных с использованием сажи, оно составило 0,0322–0,0377 %, что превышает полученные значения в 25–30 раз.

Высокая дисперсность и оптимальный химический состав (по сравнению с другими видами углеродного сырья) синтезированного карбида гафния могут быть использованы для применения в порошковой и традиционной металлургии, а также для производства огнеупорных и абразивных материалов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: gvserov@rambler.ru

### МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

© Д. т. н. **Г. В. Серов** (✉), **Ю. С. Земцова**, к. т. н. **С. М. Тихонов**, к. т. н. **А. А. Комиссаров**,

к. т. н. **Д. В. Кузнецов**

ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Присутствие в трубной стали коррозионно-активных неметаллических включений существенно снижает коррозионную стойкость труб, используемых на нефтепромыслах. К таким включениям относится алюмомагнезиальная шпинель, появление которой в стали заметно возросло с использованием периклазосодержащих огнеупоров при ковшевой обработке стали. Возможности снижения содержания в металле подобных включений или их модифицирования для устранения коррозионной активности определяются

прежде всего технологиями выплавки и обработки жидкой стали.

Рассмотрены результаты плавки низколегированной трубной стали в вакуумной индукционной печи в тигле из плавленного периклаза. Плавки проводили без шлака, для раскисления металла использовали алюминий и редкоземельные металлы. На отдельных плавках раскисление проводили только алюминием, церием и лантаном в присутствии остаточных концентраций алюминия, алюминием и иттрием. Элементный состав неметаллических

включений в литых образцах металла определяли на сканирующем электронном микроскопе. Термодинамическими расчетами оценивали активность кислорода в жидкой стали по ходу выплавки и раскисления. Установлена зависимость состава неметаллических включений от раскисленности расплава и концентрации элемента, определяющего эту раскисленность. Наибольшее присутствие включений алюмомагнезиальной шпинели отмечается в металле плавов, раскисленных алюминием. Включения алюмомагнезиальной шпинели редко встречались при раскислении иттрием и алюминием. При использовании редкоземельных элементов неметаллические включения были заметно модифицированы присутствием этих элементов в виде оксидных или сульфидных фаз.

Проанализирован режим раскисления на производственных плавках низколегированной трубной стали при выплавке в кислородном конвертере и обработке в установках ковш-печь и вакуумирования стали. Установлено влияние количества присаживаемого в расплав алюминия, его содержания в металле по ходу рафинирования на состав образующихся неметаллических включений. Предложены условия раскисления стали для модифицирования включений алюмомагнезиальной шпинели, учитывающие присутствие в стали алюминия, кремния, титана и кальция. Представлены положительные результаты испытаний коррозионных свойств металла опытных плавов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

## ЭНТРОПИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ МАСС

✉

E-mail: sersok\_07@mail.ru

© Д. т. н. В. Н. Соков ✉

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

Самоуплотнение — это совокупность технологических приемов, основанных на использовании способности компонентов формовочной смеси расширяться при нормальной или повышенной температуре. В отличие от традиционных способов сушки формовочных масс процесс самоуплотнения отличается тем, что влага фильтруется в материале в виде жидкой фазы за счет избыточного давления, развиваемого в замкнутых объемах (перфорированных или гидравлически закрытых). Природа уплотняющего компонента определяет величину внутреннего избыточного давления. При этом интенсивность фильтрационного массопереноса на 3–4 порядка выше переноса теплопроводностью.

Для самоуплотнения системе необходимо сообщать дополнительную энергию, равную энергии активации. Модификатором поля является электроэнергия, вводимая в активные подвижные смеси. Теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и совершение системой работы в замкнутом объеме. В глинополистирольных массах управляемое электрическое воздействие вызывает термодинамический процесс. Система и ее микроскопические части движутся, вызывая изменение ее кинетической энергии. Среда с изменяющимся давлением и температурно-влажностными условиями представляет значительный интерес. Она позволяет выявить роль тактики ведения самоуплотнения масс при электропрогреве, в приобретении изделиями механической прочности, а также учитывать скорость подъема температуры при выборе оптимальных режимов электротермической обработки. Регулирование напряженного состояния в массе возможно путем варьирования расположением электродов или изменением величины подаваемого электрического напряжения. Этот способ, как наиболее мобильный, широко используется нами в технологии самоуплотнения масс.

Процессы самоуплотнения связаны с активным массопереносом в начальный период и происходят при постоянном уменьшении влагосодержания фор-

мовочной смеси. 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 прикладываемого давления. Отжатие усадочной влаги и связанное с ним уменьшение среднего диаметра влагопроводящих капилляров будут продолжаться, пока давление расширяющихся гранул полистирола не будет компенсироваться силами поверхностного натяжения в капиллярах. Внутреннее гидростатическое давление и определяющееся им напряженное состояние матрицы, а также активный массоперенос способствуют диспергированию зерен глины, созданию их более плотной упаковки, препятствуют формированию коагуляционной структуры и тем самым обеспечивают усреднение концентрации дисперсной фазы во всех микрообъемах глиняного теста. При этом создаются условия для формирования более плотной структуры сырца.

Продолжительная электрообработка опасна из-за возможности перегрева массы, испарения и диффузии пара в микрокапиллярах, что ведет к созданию значительных напряжений в сети микрокапилляров за счет диффузии пара. В конечном итоге может наступить разрушение сырца. После прекращения активного прогрева наступает постепенное остывание сырца. Структура гранул полистирола стабилизируется. Изопентан начинает конденсироваться в микроячейках гранул, и происходит релаксация избыточного давления, пропорциональная температуре остывающего материала. Продолжительность этого этапа зависит от теплофизических характеристик материала и конструкции формы. Ввиду малой открытой поверхности адиабатического испарения практически не происходит, а пересушивание периферийных слоев не наблюдается. При температуре материала порядка 40 °С внутренние напряжения релаксируют полностью и

процесс формирования структуры заканчивается. При этом изделия имеют прочность, достаточную для извлечения из формы.

В результате экспериментов по изучению процесса тепло- и массопереноса в условиях самоуплотнения масс установлено:

- 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 массы;

- на конечный объем отжимаемой из материала влаги влияют скорость электропрогрева и водопотребность глиняного теста. При скоростях прогрева более 0,15 °C/с конечный объем отжимаемой влаги снижается за счет защемления ее во внутренних слоях материала;

- скорость влагоотжатия пропорциональна скорости роста давления.

Отдельное направление в исследованиях — получение самоуплотнением изделий цилиндрической

формы и изделий сложной конфигурации. Выбор параметров, регулирующих процесс самоуплотнения, осуществляется построением аналоговых моделей. В их основу положены базовые физические законы, описывающие тепло- и массоперенос, выделение тепла при электропрогреве, связи между электропроводностью и концентрацией токопроводящей фазы при разных температурах, уплотнение смеси под воздействием избыточного давления.

Метод, заложенный в технологию, позволяет совместить в одной операции ряд процессов: уплотнение минеральной части смеси, удаление усадочной влаги, выштамповывание любого профиля изделий, обеспечение четких граней и хорошей лицевой поверхности. Короткое (40–50 мин) электрогидротеплосиловое воздействие на матрицу позволяет ей быстро набирать структурную прочность, необходимую для немедленной распалубки сырца и установки его на поддоны для кратковременной (2–3 ч) досушки. Малая продолжительность процесса позволяет применять электропрогрев при самоуплотнении любых смесей, содержащих токопроводящую среду, и при любом уплотняющемся компоненте.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАВЛЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЦИРКОНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

(✉)

E-mail: vsokolov235@yandex.ru

© Д. т. н. В. А. Соколов (✉), д. т. н. М. Д. Гаспарян  
ООО «ЦИТ «СПЕЦКЕРОКОМ», г. Подольск Московской обл., Россия

Плавленные гранулированные цирконийсодержащие материалы применяют за рубежом в качестве теплоизоляционной засыпки печных агрегатов и мелющих тел бисерных мельниц. В Российской Федерации производство таких материалов отсутствует; при этом имеются сведения о грануляции металлургических шлаков и получении стеклянных шариков. В данной работе определены основные принципы технологии получения гранулированных материалов методом плавления цирконийсодержащего сырья в электродуговой печи и диспергирования расплава.

Плавление исходных материалов осуществляли в лабораторной электродуговой печи с объемом рабочего пространства 0,08 м<sup>3</sup>, оснащенной трансформатором мощностью 430 кВ·А. Для плавки оксидных материалов использовали графитовые электроды диаметром 100 мм. Для устранения возможного восстановления оксидов кремния и циркония, а также получения в составе гранул химически стойкой стеклофазы применяли окислительный метод плавления шихты, обеспечивающий минимальный контакт между графитовым электродом и расплавом во время плавки. Такой режим плавления позволяет получать практически безуглероженный расплав.

Отработку режимов плавления проводили на основе шихты из цирконового концентрата марки КЦЗ производства ВГМК (Украина). Определен оптимальный электрический режим плавления: I период (50 %) — на-

пряжение на электродах 150 В, ток 1 кА; II период (50 %) — напряжение на электродах 200 В, ток 0,7–0,8 кА. Для получения гранулированных материалов электродуговая печь была дополнительно оборудована расплавоприемником, выполненным из графита, с калиброванным выпускным отверстием, обеспечивающим выпуск струи расплава определенного диаметра; воздушной форсункой, обеспечивающей распыление расплава из расплавоприемника (давление сжатого воздуха, подводимого к форсунке, не превышало 2,5 ат); приемным контейнером с водой и мишенью, ограничивающей пролет гранул после распыления.

Испытания дополнительных узлов электродуговой печи проводили с использованием расплава бакорового состава Бк-33 (химический состав, %: ZrO<sub>2</sub> 33, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 51, SiO<sub>2</sub> 14, Na<sub>2</sub>O 1,2). При загрузке 50 кг шихты на плавку продолжительность ее расплавления составляла 30–40 мин. Подготовленный в печи расплав тонкой струей сливали в расплавоприемник с последующим диспергированием с помощью воздушной форсунки. Гранулированный материал воздушным потоком форсунки направляли на металлическую мишень, расположенную на расстоянии 3 м от печи, и собирали в контейнер, заполненный водой. После охлаждения гранулы извлекали из контейнера, сушили и подвергали рассеву на фракции. Опытными плавками определено, что выход мелких фракций (0,4–2,0 мм) составляет более 80 % и возрастает с увеличением давления сжатого воздуха.

Всего получено 200 кг гранул состава Бк-33. Прочностные свойства гранул состава Бк-33 оценивали на микротвердометре ПМТ-3. Так, среднее значение микротвердости гранул диаметром 2,5 мм составляло 1070 кгс по сравнению с микротвердостью 840 кгс цирконистых гранул типа ER 120 (Франция) и микротвердостью 600 кгс стеклошариков Клинского стеклозавода.

Гранулированный цирконистый материал получали плавлением цирконового концентрата с содержанием 65 %  $ZrO_2$  и 32,5 %  $SiO_2$ . Получена опытная партия массой 250 кг при выходе гранул мелких фракций (<1,6 мм) порядка 70–80 %. По данным рентгенофазового анализа, гранулы представляют собой двухфазную систему, состоящую из кристаллической части — бадделеита

и стеклофазы, которую формируют кремнезем и примеси циркона ( $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  и др.). По данным петрографических исследований, плавленый гранулированный цирконистый материал имеет неполнокристаллическую структуру, сформированную в основном мелкими зернами бадделеита размерами 0,01–0,03 мкм и стеклофазой. Лабораторные плавки шихт разного состава (бакоровых и цирконовых) показали возможность получения гранул размерами 1–5 мм. Однако работа такой установки малопроизводительна и носит периодический характер. Поэтому для промышленного производства гранулированных материалов предложена специализированная установка, к которой разработаны исходные требования.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ОСОБЕННОСТИ АДсорбЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФЕНОЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

✉  
E-mail: s2305028@yandex.ru

© К. т. н. А. И. Солдатов, к. т. н. С. И. Боровик ✉

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

Интенсивное развитие науки и техники, внедрение новых производственных процессов в металлургии требуют создания высококачественных огнеупорных материалов с повышенными требованиями к эрозийной и химической устойчивости, теплофизическим свойствам, механической прочности и другим показателям, определяющим критерии работоспособности материала в процессе эксплуатации. В последние годы интерес к углеродсодержащим огнеупорам возрастает благодаря их высокой термостойкости и устойчивости к шлаковой коррозии. Одним из основных направлений дальнейшего развития огнеупорных технологий является переход к управлению свойствами материалов. Требования, предъявляемые к огнеупорам данного вида, могут быть с успехом реализованы при обеспечении высокого уровня взаимодействия между основными компонентами рецептуры.

При формировании структуры периклазоуглеродистых огнеупоров основными видами взаимодействия компонентов системы являются ФФС-периклаз и ФФС-углерод. И если первый вид взаимодействия осуществляется за счет образования связи  $Mg-O-Ph$ , где  $PhO$  — фенольный участок ФФС, то взаимодействие ФФС с поверхностью углеродного компонента изучено в настоящее время недостаточно. Кроме того, определенный интерес представляет процесс взаимодействия фенола с углеродным сорбентом при использовании его в технологии очистки сточных вод от растворенного в них фенола. Это взаимодействие, обусловленное адсорбционной способностью сорбента, будет определять также полноту удаления фенола из водного раствора.

Цель настоящей работы — изучение процесса адсорбционного взаимодействия фенола с поверхностью углеродного материала и влияния структуры поверхности углеродного материала на это взаимодействие. В качестве сорбентов использовали 17 видов углерод-

ных материалов, характеризующихся различиями в степени кристаллической упорядоченности и разнообразным химическим составом поверхностных функциональных групп.

Для исключения влияния удельной поверхности углеродного сорбента на его адсорбцию все показатели пересчитывали на единичный фрагмент поверхности. Адсорбцию фенола проводили в стационарных условиях из водного раствора с концентрациями фенола 0,001 и 0,4 г/л.

Установлено, что при адсорбции из растворов с низкой концентрацией фенола наибольшее влияние на этот процесс оказывают карбоксильные группы поверхности углеродного сорбента, тогда как из растворов с высокой концентрацией фенола наибольшее влияние на этот процесс оказывают карбонильные группы поверхности углеродного сорбента. Это свидетельствует о возможных различиях адсорбционного взаимодействия фенола с углеродной поверхностью при различных концентрациях фенола. При высокой концентрации фенола в водном растворе, когда наибольшее влияние оказывают карбонильные группы поверхности углеродного сорбента, установлено, что основные три вида структур карбонильных групп поверхности углеродного сорбента по степени влияния на адсорбцию фенола могут быть расположены в следующий ряд: кетонные > альдегидные > хиноидные.

Изучены факторы, влияющие на процесс регенерации сорбента после адсорбции на нем фенола. Установлено, что на степень десорбции фенола с поверхности углеродного сорбента наибольшее влияние оказывают условия хранения сорбента после выведения его из адсорбционного процесса и срок хранения такого сорбента. Не рекомендуется хранить сорбент в сухом виде; его хранят только под слоем растворителя. Причем срок хранения такого сорбента не должен превышать 3 сут.

Таким образом, для обеспечения высокого показателя адсорбции фенола и фенольных продуктов на углеродной поверхности необходимо провести регулирование химической структуры поверхности углеродного материала с преимущественным формированием

на этой поверхности карбонильных групп. Из числа возможных видов карбонильных групп, способствующих росту адсорбции фенола, наиболее предпочтительно формирование кето-групп, менее предпочтительно — альдо-групп.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)  
E-mail: chemic@yandex.ru

### ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛЯТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРОВ

© Д. т. н. **С. А. Суворов**, к. т. н. **В. В. Козлов** (✉), к. т. н. **Н. В. Арбузова**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

Развитие инновационных высокотемпературных процессов и технологий формирует потребность в новых материалах, марках стали, сплавах, свободных от загрязнений, ухудшающих свойства и качество металлов. Это повышает требования к ресурсной работоспособности огнеупоров, снижению загрязнений металла продуктами их разрушения и износа, а также к стабильности и эффективности эксплуатации конструкций, выполненных из огнеупоров.

Научные и прикладные результаты исследований огнеупоров, насыщенных углеродом, свидетельствуют о необходимости обновления и дополнения информации о взаимосвязанных фазовых и структурных трансформациях и физико-технических свойствах. Для безобжиговых карбонированных огнеупоров большое значение имеют пороговые температурные условия формирования, приобретения и изменения свойств в циклах производства и эксплуатации: термообработки (243–573 К), карбонирования (573–1273 К), графитизации (>1273 К) и эксплуатации в контролируемых условиях (до 1973 К). Для улучшения физико-технических свойств, повышения надежности и ресурса эксплуатации необходимо исследование потенциальных возможностей регулятивного изменения показателей свойств однонаправленного развития в конкуренции с неоднонаправленным изменением свойств, что приводит к деградации и потере свойств в условиях воздействия факторов нагружения: химических, физико-химических, термомеханических, высокотемпературных.

В огнеупорных изделиях из зернистых материалов по технологическим причинам допускается образование фрагментов и в целом фрагментированных структур с несовершенствами, влияющими на изменение

свойств от внешних факторов. Ослабление нагрузки от внешних факторов не возвращает материал в исходное состояние. Для таких структур свойственно противонаправленное (разнонаправленное) развитие характеристик показателей свойств — дивергенция: повышение пористости — снижение шлакоустойчивости, прочности, огнеупорности и т. д. В карбонированных огнеупорах повышается однородность показателей свойств, снижается размерность фрагментов микроструктуры, а также сохраняется способность локализации, снижения напряжений из-за релаксационных процессов, перехода структуры материала в более стабильное состояние.

Упрощенная характеристика ресурсных возможностей огнеупоров и футеровки ограничивается эмпирической величиной линейного износа толщины рабочего слоя футеровки к числу циклов (массе) продукции, выпущенной за этот период, сдерживает разработки, накопление и использование удельных весовых ресурсных характеристик износа (кг/(м<sup>2</sup>·ч)) для балансовых весовых расчетов износа огнеупоров в кладке футеровки и продуктов износа огнеупоров (60–70 кг/плавку), перешедших в ванну металлического расплава сталеплавильного ковша и оказывающих негативное влияние на свойства расплава и закристаллизованного металла. Необходимы введение объективного инструментального измерения износа огнеупоров и конструкций из них не в миллиметрах (сантиметрах, метрах), а в граммах (килограммах, тоннах), нормирование требований и параметров качества огнеупоров по вносимым загрязнениям и снижению марочности металла, требующим больших затрат на их устранение, и др.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)  
E-mail: chemic@yandex.ru

### ОБОБЩЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3$ - $MgO$ - $C$ - $B$ - $Al$ - $O$

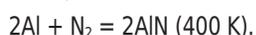
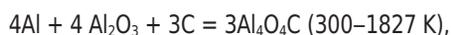
© Д. т. н. **С. А. Суворов**, к. т. н. **В. В. Козлов** (✉), к. т. н. **Н. В. Арбузова**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

Проведены экспериментальные и термодинамические исследования химических и фазовых преобразований в разрезах системы  $Al_2O_3$ - $MgO$ - $C$ - $B$ - $Al$ - $O_2$  с участи-

ем твердых и газовых сред с различным потенциалом (окислительным, восстановительным, нейтральным). Установлены образование и сосуществование фаз в

твердом состоянии и пара. Реакции взаимодействия корунда и углерода сопровождаются образованием больших объемов газа в продуктах обжига в интервале 30–2250 °С. Образующиеся в твердом состоянии  $Al_4C_3$ ,  $Al_4O_4C$ ,  $Al_8B_4C_7$ , сосуществующие сочетания с  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  с  $MgAl_2O_4$  либо как промежуточные участвуют в синтезе карбидных, оксикарбидных или борокарбидных фаз:



Применительно к выявлению действия антиокислительных добавок продуктов обжига в диапазонах 300–1600 °С в восстановительной среде и 1300–1530 °С в окислительной исследовано изменение газового состава в композиции корунда и углерода с добавками  $B_4C$ ,  $Al_4C_3$ ,  $B$ ,  $B_2O_3$  и  $Al$ . До 300 °С изменения фазового состава не происходит. При 1000 °С в восстановительной среде при введении порошка  $Al$  образуется  $Al_4C_3$ , а при введении металлического алюминия и аморфного бора образуются  $Al_4C_3$  и  $B_4C$ . В окислительной среде при 1530 °С

полностью выгорает углерод, а карбидные фазы, содержащие  $Al$  и  $B$ , окисляются до  $Al_2O_3$  и  $AlBO_2$ , который в присутствии в образце  $MgO$  вступает в реакцию с образованием  $MgAl_2O_4$ . Количество образующегося карбида алюминия в карбонированном огнеупоре при взаимодействии металлического расплава  $Al$  с углеродом (при содержании в огнеупоре 3–5 мас. %  $Al$ ) составляет 4–8 %.

Фазовый состав карбонированного корундового огнеупора может быть таким, мас. %: 65–85  $Al_2O_3$ , 10–25  $C$ , 5–10  $Al_4C_3$ , карбонированного шпинельнокорундового материала, мас. %: 75–95  $Al_2O_3$ , 5–24  $MgAl_2O_4$ , до 1 %  $C$ . До 1300 °С в огнеупорах присутствует 4–6 мас. %  $Al_4C_3$ , выше 1530 °С  $Al_4C_3$  в окислительной среде трансформируется в  $Al_2O_3$ , а при введении в состав периклаза — в шпинель. Полагаем, что составы огнеупорных материалов, сложенные ансамблем фаз  $Al_2O_3$ – $MgAl_2O_4$ –твердый раствор  $Al_2O_3$  и  $MgAl_2O_4$ – $Al_4C_3$ – $Al_8B_4C_7$  с высокой температурой плавления, химически устойчивы в расплавах черных и цветных металлов и смогут стать группой «белых» огнеупоров для получения высокочистых металлов и сплавов. Это подтверждено лабораторными опытами с расплавами  $Cr$ ,  $Fe$ ,  $Ni$ ,  $Co$ ,  $Cu$  и  $Al$ .

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: chemic@yandex.ru

#### МОДИФИКАЦИЯ ШЛАКОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОРРОЗИИ ФУТЕРОВКИ И ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАМИ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ

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

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»,  
кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов,  
Санкт-Петербург, Россия

Шлаковая коррозия — одна из главных причин досрочного вывода из эксплуатации футеровки агрегатов внепечной обработки стали. Кроме того, существует серьезная проблема силикатного распада металлургических шлаков вследствие образования двухкальциевого силиката  $C_2S$ , который кристаллизуется при охлаждении шлакового расплава, проникшего в неплотности футеровки, и может вызывать сколы и растрескивание огнеупоров (за счет  $\beta$ – $\gamma$ -перехода  $C_2S$ ), значительно снижая ресурс футеровки. Силикатный распад выражается еще и в том, что затвердевший шлак рассыпается в пылеобразную шлаковую муку, которая разносится ветром на значительные расстояния, загрязняет почву и ухудшает экологическую обстановку в районах, прилегающих к шлакоотвалам и шлаковым хранилищам.

На кафедре ХТТНиСМ СПбГТИ(ТУ) разработаны тематическая модель и программное обеспечение для моделирования равновесного субсолидусного фазо-

вого состава системы  $CaO$ – $MgO$ – $Al_2O_3$ – $SiO_2$ – $FeO$ – $Fe_2O_3$  для определения областей первичной кристаллизации фаз, оценки температуры ликвидуса расплавов. Предложенное решение может быть применено для целенаправленной модификации сталеплавильных шлаков для их стабилизации и управления шлаковой коррозией. Правильность предложенного математического подхода подтверждается экспериментальными исследованиями образования фаз как продуктов взаимодействия огнеупоров с синтетическими шлаками методом рентгенофазового анализа синтетических шлаков химического состава, мас. %:  $CaO$  43–67,  $MgO$  2–8,  $Al_2O_3$  5–40,  $SiO_2$  8–21. Предлагаемая методика моделирования фазообразования шлаковых систем может быть применена не только для модификации химического состава шлаков для повышения ресурса футеровки металлургического агрегата, но и для синтеза фаз, обладающих вяжущими свойствами, для использования в производстве бетонов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ВИХРЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ (ВЭГ)**

(✉)

E-mail: suvorov8225@yandex.ru

© **Д. С. Суворов**<sup>1</sup> (✉), **Б. Б. Хайдаров**<sup>1</sup>, **Д. В. Лысов**<sup>1</sup>, **П. А. Жукова**<sup>1</sup>, **В. И. Казаков**<sup>2</sup>,  
к. т. н. **В. В. Горчаков**<sup>3</sup>, к. т. н. **Д. В. Кузнецов**<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», Москва, Россия<sup>2</sup> ООО «Функциональные наноматериалы», Москва, Россия<sup>3</sup> ООО НПП «Интор», г. Новочеркасск, Россия

Снижение материальных затрат на тонну производимой стали — одно из важнейших поисковых направлений работы металлургических предприятий. В частности, улучшение эксплуатационных характеристик огнеупорных материалов является важной задачей как с прикладной, так и с материаловедческой точки зрения. Решение этой задачи позволит повысить не только качество выпускаемой продукции, но и производительность и рентабельность производства. Помимо разработки принципиально новых видов огнеупорных изделий возможно модифицирование уже имеющихся материалов с применением различных высокодисперсных модифицирующих добавок.

Исследовано влияние наномодифицирования на структурные и физико-механические показатели муллитокорундовых огнеупоров разного типа (для фурм УПК и опорных блоков тележек методической печи). Показана возможность применения вихревого электромагнитного гомогенизатора для значительного улучшения эксплуатационных характеристик огнеупоров. Установлены эффективность использования и оптимальная концентрация нанодисперсного диоксида кремния. Образцы, полученные в ходе работы, исследовали с применением современных методик. Исследования выполняли с использованием вихревого электромагнитного гомогенизатора (ВЭГ-80), который был разработан и изготовлен НПП «Интор» совместно с кафедрой ФНСиВТМ НИТУ «МИСиС».

По результатам работы определены оптимальные параметры процесса модифицирования огнеупорных материалов разного назначения с точки зрения влияния на их физико-химические параметры. Оптимальная концентрация наночастиц SiO<sub>2</sub> в образцах бетонов составила 0,8 мас. % в пересчете на массу вяжущего материала (0,04 мас. % в пересчете на массу бетона). На лабораторных образцах из бетонов для блоков и фурм достигнуто достоверное увеличение истинной пикнометрической плотности на 11 и 20 % соответственно. При этом прирост прочности лабораторных образцов после обжига составил 23,8 (на бетоне для блоков) и 32,1 % (на бетоне для фурм). На основании полученных данных предложены оптимальные режимы модифицирования с использованием установки вихревой электромагнитной гомогенизации для производства опытных партий бетонов для опорных блоков для проходных тележек методической печи ЛПЦ-3 (North Cast ABL 70.022) и неформованных бетонов для фурм верхней продувки металла аргоном в сталеразливочном ковше в установке пещковш (North Cast BL 80.023/01). Результаты исследований и испытаний указывают на возможность за счет наномодифицирования улучшить эксплуатационные параметры муллитокорундовых изделий не менее чем на 20 %. Промышленное освоение предлагаемой технологии обеспечит существенный экономический эффект за счет снижения затрат на закупку огнеупорных материалов и увеличения межремонтного цикла.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕТАЛЛОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА СЛЯБОВЫХ  
МНЛЗ НА ДВИЖЕНИЕ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ  
ПРИ ОТКЛОНЕНИИ СТРУИ ОТ ТРЕБУЕМОГО ПОЛОЖЕНИЯ**

(✉)

E-mail: ssuharev@magnezit.com

© **С. В. Сухарев**<sup>2</sup> (✉), к. т. н. **А. В. Заболотский**<sup>3</sup>, **П. В. Котровский**<sup>1</sup>, к. т. н. **М. Ю. Турчин**<sup>1</sup><sup>1</sup> ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия<sup>2</sup> ООО «Группа «Магнезит», Москва, Россия<sup>3</sup> ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена оценке влияния конструкции металлоприемного устройства в промежуточном ковше слябовых МНЛЗ на снижение турбулентности потоков при отклонении струи металла в процессе разлива от требуемого положения. Приведены результаты компьютерного моделирования встречающихся в производственной практике вариантов

смещения струи металла из сталеразливочного ковша в промежуточный от целевой точки ввода. Проведено сравнение распределения потоков металла в промежуточном ковше с разными конструкциями металлоприемников. Даны рекомендации по снижению турбулентности потоков для рассмотренных случаев.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОЛЫХ СТЕРЖНЕЙ МЕТОДОМ  
СВС-ЭКСТРУЗИИ(✉)  
E-mail: chij@ism.ac.ru

© А. П. Чижиков (✉), к. т. н. П. М. Бажин, д. ф.-м. н. А. М. Столин

ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мерджанова РАН (ИСМАН)», г. Черноголовка Московской обл., Россия

Для получения компактных керамических изделий в ИСМАН был разработан метод СВС-экструзии, который за счет сочетания процессов горения в режиме СВС и последующего высокотемпературного сдвигового деформирования позволяет в одну технологическую стадию получать изделия заданных формы и размера из порошков исходных компонентов. Схема реализации метода показана на рисунке: прессованная порошковая заготовка помещается в специальную пресс-форму, при помощи иницилирующего устройства запускается процесс СВС, волна горения проходит по образцу. После некоторого времени задержки прикладывается внешнее давление, и горячая масса синтезированного материала через формирующую матрицу выдавливается в калибр. Такая схема процесса позволяет достичь высокой степени деформации материала, что дает возможность получать изделия, близкие по плотности к теоретической.

Обычно в технологической практике СВС-экструзии формованию подвергаются кристаллические материалы, обладающие способностью к пластическому течению при высоких температурах. Однако если в ходе реакции образуется большое количество жидкой фазы, а процесс выдавливания начинается до ее кристаллизации, то в ходе экструзии в калибре формируется полый стержень. Формирование таких стержней можно объяснить возникновением эффекта разбухания струи в процессе экструзии. Этот эффект хорошо изучен в технологии полимеров и заключается в увеличении диаметра струи материала в 3–4 раза при выдавливании его через узкий канал небольшой длины. Возникновение этого эффекта в полимерных жидкостях связано с их структурой, а именно наличием длинных полимерных цепочек, а также их полидисперсностью. Благодаря такой структуре полимерные жидкости могут обладать

вязкоупругими свойствами. При больших скоростях деформации при выдавливании в узкий канал в материале накапливается упругая деформация, которая при выходе из канала релаксирует, приводя к увеличению диаметра струи.

Структура СВС-материалов не похожа на структуру полимеров. Однако возникновение схожего эффекта можно объяснить проявлением у продуктов горения при экструзии вязкоупругих свойств. Это может быть связано с тем, что в ходе СВС образуется большое количество жидкой фазы за счет легкоплавких исходных компонентов. Одновременно с образованием расплава в зоне горения происходит образование полидисперсных тугоплавких продуктов синтеза. Таким образом, за зоной горения образуется расплав с распределенными по нему закристаллизовавшимися частицами продуктов синтеза разного размера, т. е. вязкоупругая жидкость, аналогичная по структуре расплаву полимеров.

В данной работе методом СВС-экструзии были получены керамические стержни на основе  $Al_2O_3$  длиной более 100, диаметром 6 и внутренним диаметром 3 мм, которые могут найти практическое применение как элементы цилиндрических тиглей в металлургии.

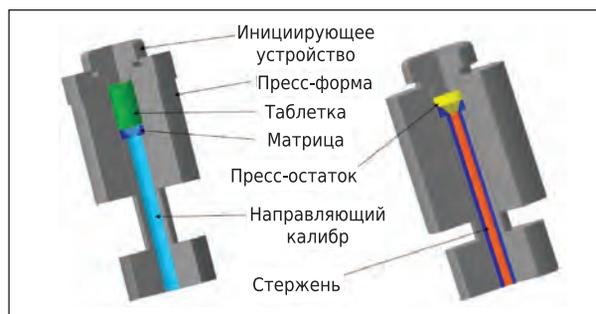


Схема процесса СВС-экструзии

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

## КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ SiC–AlN И ЕГО СВОЙСТВА

(✉)  
E-mail: gulya-ka11@yandex.ru

© К. т. н. Ш. Ш. Шабанов, к. ф.-м. н. Г. Д. Кардашова (✉)

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», г. Махачкала, Россия

Керамические материалы SiC–AlN являются одними из перспективных в современной высокотемпературной электронике. Известно, что одной из главных технологических проблем при получении керамики на основе SiC является высокая плотность. В данной работе исследованы микроструктура и тепловые свойства керамических материалов SiC–AlN.

Керамика SiC–AlN была получена методом горячего прессования в среде  $N_2$  при температуре ниже 2170

К и давлении до 35 МПа в течение 1 ч. Для получения керамики SiC–AlN использовали зеленый порошок SiC и AlN со средней дисперсностью 2,4 и 1 мкм соответственно. Порошки измельчали и смешивали в следующих соотношениях: 0,9SiC–0,1AlN; 0,7SiC–0,3AlN; 0,5SiC–0,5AlN; 0,3SiC–0,7AlN и 0,1SiC–0,9AlN. Для керамики SiC–AlN плотность образцов в интервале составов с 30–90 мас. % AlN остается практически постоянной и соответствует теоретической плотности. Кажущаяся

ся плотность образцов с 10 мас. % AlN составляет в среднем  $3,16 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствует пористости около 1,6 %. У образцов с 30–90 мас. % AlN плотность в среднем колеблется в пределах  $3,21 \cdot 10^3$ – $3,22 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Были проведены химический и структурный анализы образцов SiC<sub>0,7</sub>–AlN<sub>0,3</sub>, SiC<sub>0,5</sub>–AlN<sub>0,5</sub>, SiC<sub>0,3</sub>–AlN<sub>0,7</sub>, SiC<sub>0,1</sub>–AlN<sub>0,9</sub> после травления в 47,7 %-ной плавиковой кислоте в течение 13 ч при комнатной температуре. По данным химического состава, содержание кислорода уменьшилось, что позволяет предположить удаление оксидной пленки вследствие травления. Рельефная поверхность образцов свидетельствует о наличии различных соединений, что подтверждается полученным спектром: в ямках присутствуют соединения алюминия

и азота, а на возвышенностях — кремния и углерода. Средний размер зерна 2–5 мкм. Присутствуют также нанозерна размерами менее 100 нм.

Были исследованы зависимости теплопроводности, теплоемкости и ТКЛР керамики SiC–AlN исследованных составов в диапазоне 300–1200 К. Установлено, что теплопроводность керамики SiC–AlN уменьшается с ростом температуры и содержания AlN в SiC: от 35 Вт/(м·К) у состава с 10 мас. % AlN при 300 К до 3–5 Вт/(м·К) у состава с 90 мас. % AlN при 1200 К; ТКЛР увеличивается с ростом температуры и содержания AlN в SiC; удельная теплоемкость повышается с ростом температуры и вблизи температуры Дебая переходит к насыщению.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ

### ОГНЕУПОРНЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЦЕМЕНТОВ

(✉)

© Д. т. н. Г. Н. Шабанова (✉), д. т. н. А. Н. Корогодская

E-mail: gala-shabanova@ukr.net

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей, г. Харьков, Украина

В настоящее время основными тенденциями развития огнеупорной промышленности в мире являются: увеличение ассортимента огнеупорных изделий и материалов, которые обеспечивают высокие показатели стойкости в условиях службы в современных металлургических агрегатах; расширение области применения огнеупорных наливных масс и бетонов, не требующих для формирования изделий и футеровки дорогостоящего оборудования; создание новых высокоэффективных видов огнеупорных материалов и изделий, а также огнеупорных систем, имеющих высокий потенциал в обеспечении текущего ремонта футеровки в процессе ее эксплуатации. При этом основной эффект по снижению удельного расхода огнеупоров достигается за счет создания новых видов огнеупорных материалов и технологических усовершенствований при их производстве.

В этом плане украинская металлургия ощущает жесткий дефицит высококачественных огнеупорных изделий, которые обеспечивали бы эксплуатационные показатели, соответствующие лучшим мировым аналогам. Решение этой проблемы представляется возможным только в случае привлечения соответствующих научных разработок и лицензионных ноу-хау. На кафедре технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей НТУ ХПИ разработаны составы алюмохромитных цементов с использованием в качестве исходных материалов отходов химической промышленности. Установлено, что полученные материалы являются перспективными для разработки новых составов огнеупорных коррозионно-стойких конструкционных материалов.

■ Разработаны составы высокопрочных огнеупорных бетонов на основе алюмохромитных цементов с различными заполнителями, которые характеризуются следующими показателями: предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут твердения 49–56 МПа; открытая пористость 10,9–11,6 %; огнеупорность 1800–2000 °С; термостойкость (1300 °С – вода) более 25 теплосмен; температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа 1510–1560 °С; ТКЛР  $8,4 \cdot 10^{-6}$ – $11,6 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>; степень разупрочнения в интервале 20–1000 °С 11,4–17,6 %; коррозионная стойкость (по глубине проникновения) для основного доменного шлака 2 мм, для расплава металла — отсутствует.

■ Проведены физико-химические исследования бетонов на основе алюмохромитных цементов и установлено, что до обжига все образцы бетонов имеют плотную, практически беспористую структуру, что обуславливает высокую шлако- и металлостойкость материала. В процессе эксплуатации видимых видоизменений огнеупорного бетона не происходит, даже при температурах выше 1600 °С.

■ Разработана общая технологическая схема производства тугоплавких неформованных материалов на основе алюмохромитных цементов, по которой предусмотрено производство сухих огнеупорных бетонных смесей, бетонных масс для создания монолитной футеровки и сложнопрофильных изделий, бетонных изделий для формирования футеровки блоками. При необходимости технологическая схема может быть модифицирована под конкретное производство и разнообразную выпускаемую продукцию.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: tambovbest@yahoo.com**СТОЙКОСТЬ К ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЮ ЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ,  
УПРОЧНЕННОЙ КОРУНДОМ**© К. ф.-м. н. **А. В. Шуклинов** (✉), д. ф.-м. н. **А. А. Дмитриевский**, к. ф.-м. н. **А. О. Жигачев**,  
**Д. Г. Жигачева**, **Т. А. Дьячек**, к. ф.-м. н. **Н. Ю. Ефремова**, **Г. В. Григорьев**, **А. А. Топчий**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия

Начиная с 1975 г. (обнаружена возможность контроля над фазовым превращением тетрагональной фазы  $t\text{-ZrO}_2$  в моноклинную  $m\text{-ZrO}_2$  путем введения стабилизирующих добавок) область практических приложений циркониевой керамики непрерывно расширяется. Вместе с этим возрастают требования к ее рабочим характеристикам, в первую очередь к соотношению прочность : пластичность (твердость : вязкость разрушения) при сохранении стойкости к внешним (в том числе тепловым) воздействиям. Одним из наиболее действенных способов улучшения механических свойств циркониевой керамики является ее упрочнение введением корунда (Alumina-Toughened Zirconia — ATZ). В реальных условиях эксплуатации изделия из ATZ могут быть подвержены многократным (циклическим) тепловым воздействиям, что накладывает соответствующие требования на стойкость ATZ к тепловым нагрузкам. В связи с этим цель работы заключалась в исследовании влияния термоциклирования циркониевой керамики, упрочненной корундом, на ее структуру, фазовый состав и механические свойства.

Для изготовления образцов нанодисперсные порошки  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$  (стабилизатор тетрагональной фазы  $t\text{-ZrO}_2$ ) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  смешивали в следующих пропорциях: концентрация  $\text{CaO}$   $C_{\text{CaO}} = 6,5$  мол. % (по отношению к  $\text{ZrO}_2$ ), корунда  $C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 5$  мас. % (по отношению к  $\text{CaO-ZrO}_2$ ). Более детально методика подготовки образцов описана в статье: Дмитриевский А. А., Жигачев А. О., Жигачева Д. Г., Тюрин А. И. ЖТФ. 2019. Т. 89, № 1. С. 107–111). Термоциклирование проводили в несколько этапов с последовательным повышением температуры ( $T_1 = 150$  °С,  $T_2 = 300$  °С,  $T_3 = 500$  °С и  $T_4 = 800$  °С). Каждый этап состоял из пяти циклов нагрева, выдержки при достигнутой температуре в течение 1 ч и охлаждения. Фазовый состав, микротвердость и вязкость разрушения определяли после каждого цикла терми-

ческих воздействий. Кроме того, на разных этапах термообработки получали СЭМ-изображения поверхности образцов.

Установлено, что циклическая термообработка исследуемой ATZ-керамики не вызывает существенных изменений фазового состава  $\text{ZrO}_2$  и, как следствие, микротвердости  $H$  и вязкости разрушения  $K_{Ic}$  материала (см. таблицу), а также состояния поверхности.

Таким образом, разработанная ATZ-керамика демонстрирует высокую стойкость к циклическим тепловым воздействиям. При этом следует отметить, что исследованный интервал тепловых воздействий

$T$ , °С	$C_{m\text{-ZrO}_2}$ , %	$C_{t\text{-ZrO}_2}$ , %	$C_{c\text{-ZrO}_2}$ , %	$H$ , ГПа	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
0	10	87	3	12,60	5,60
150	11	85	2	12,30	5,75
300	10	87	3	12,75	5,85
500	12	86	2	12,30	5,55
800	12	87	1	12,70	5,70

включает значения температур, достигаемых в неэкстремальных условиях эксплуатации керамических изделий. Достигнутые показатели (стойкость структуры поверхности, фазового состава и механических свойств ATZ-керамики по отношению к термоциклированию) представляют интерес для практических приложений, в том числе для использования изделий при повышенных температурах.

\*\*\*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10405). Результаты были получены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г. Р. Державина. Авторы благодарят Александра Жигачева за помощь в получении СЭМ-изображений.*

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И РАЗРАБОТКИ(✉)  
E-mail: tyarushina@magnezit.com**ВЛИЯНИЕ ОДНОСЛОЙНЫХ УНТ НА СВОЙСТВА ОГНЕУПОРОВ  
СОСТАВА MgO–C С УЛЬТРАНИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА:  
ОГНЕУПОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**© К. т. н. **Т. В. Ярушина**<sup>1</sup> (✉), к. т. н. **М. Ю. Турчин**<sup>1</sup>, **М. А. Ерошин**<sup>1</sup>, к. х. н. **В. Е. Мурадян**<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «Группа Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия<sup>2</sup>ООО «ОКСиАл.ру», г. Новосибирск, Россия

Однослойные углеродные нанотрубки (УНТ) являются новой универсальной добавкой, способной менять и усиливать функциональные свойства различных материалов, в том числе огнеупорных. УНТ представляют собой свернутый в цилиндр графеновый лист толщиной в один атом. Обычно диаметр однослойных УНТ составляет от 0,8 до 5,0 нм, длина от 1 до 500 мкм. Главное свойство УНТ заключается в их сверхпрово-

димости — чрезвычайно высокой электропроводности, соответствующей баллистическому механизму переноса заряда (они могут пропускать миллиард ампер на квадратный сантиметр), и в электроэмиссионных характеристиках. Приложенное к УНТ магнитное поле приводит к появлению новых энергетических уровней электронов, что дополнительно повышает их электропроводность. Сразу после синтеза УНТ слипаются в

пучки из десятков нанотрубок, что ведет к частичной потере их функциональных свойств. Чтобы добиться максимальной эффективности от введения УНТ в огнеупор, пучки необходимо разбить.

Известно, что сверхпроводимость в материале возникает при образовании так называемых «куперовских пар» — объединений двух электронов, а две области сверхпроводника, разделенные тонким слоем изолирующего материала, образуют «джозефсоновский переход». Эффект Джозефсона заключается в движении электрического тока через переход после сообщения системе заряда и даже в отсутствие электрического и магнитного полей. Добившись от матричной части углеродсодержащих огнеупоров способности к «джозефсоновскому переходу», можно радикально улучшить структуру и свойства их коксового каркаса, добиться новых, необычных свойств.

Из всех исходных компонентов периклазоуглеродистых изделий периклаз характеризуется наименьшей электропроводностью — около  $10^{-8}$  См/м, поэтому его можно отнести к изолирующим материалам. Смесь тонкодисперсного периклаза и однослойных УНТ была обработана в специальной установке активации процессов во вращающемся электромагнитном поле, и с ее использованием на промышленном прессе HPF-IV-2000 были изготовлены в виде изделий нормальных размеров (230×115×65 мм) модельные образцы периклазоуглеродистых изделий с ультранизким содержанием углерода. Опыт показал, что использование обработанной во вращающемся электромагнитном поле матрицы с добавкой однослойных УНТ значительно повлияло

на важнейшие физико-технические свойства изделий как после термообработки, так и после коксования при 1000 °С. Кажущаяся плотность изделий увеличилась от 3,07 до 3,16 г/см<sup>3</sup> после термообработки и от 3,02 до 3,14 г/см<sup>3</sup> после коксования. Предел прочности при сжатии после термообработки увеличился на 69,88 %, динамический модуль упругости снизился на 16,64 %. После коксования предел прочности при сжатии увеличился на 468,57 % (!), динамический модуль упругости снизился на 5,87 %. Повысился предел прочности при изгибе в диапазоне 600–1400 °С; значительно уменьшилась теплопроводность в области 400–950 °С, причем с тенденцией замедления снижения скорости с ростом температуры (для огнеупора с модифицированной матрицей); снизились показатели относительного удлинения и ТКЛР в диапазоне 20–1500 °С.

Известно, что увеличение модуля упругости неблагоприятно сказывается на стойкости изделий к тепловому удару и добиться его снижения при повышении прочности при сжатии, особенно после коксования при 1000 °С, весьма сложно. При введении однослойных УНТ в шихту при значительном увеличении прочности при сжатии изделий и после термообработки, и после коксования наблюдается эффект снижения динамического модуля упругости, а следовательно, термостойкость и коррозионная стойкость изделий возрастают. Введение однослойных УНТ в матрицу огнеупора путем обработки во вращающемся электромагнитном поле положительно и существенно влияет на физико-технические показатели огнеупоров состава MgO–C с ультранизким содержанием углерода.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СХЕМ ФУТЕРОВКИ СТАЛРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

✉

E-mail: axelrodlev@yandex.ru

© К. т. н. **Л. М. Аксельрод** ✉, **В. Гартен**

VGH AG — Victoria Garten Hüttenindustribedarf AG, г. Дюссельдорф, Германия

Решение задач внепечной обработки стали превратило сталеразливочный ковш в многофункциональный агрегат. Разнообразие технологий и огнеупорных материалов позволяет с учетом реальных условий эксплуатации сталеразливочных ковшей осуществлять поиск технических решений производственных задач, включая оценку влияния на качество конечной продукции и оптимизацию схем футеровки сталеразливочных ковшей. Важная составляющая предлагаемых технических решений — наличие специалистов, разрабатывающих технический проект, контролирующих качество производимых огнеупорных материалов и осуществляющих авторский надзор за выполнением футеровочных работ, а также передающих специалистам заказчика опыт безаварийной и экономически оптимальной технологии эксплуатации футеровки

сталеразливочных ковшей. Если для шлакового пояса сталеразливочного ковша нет альтернативы периклазоуглеродистым огнеупорам, то для футеровки стен и дна имеется множество вариантов с использованием формованных изделий — периклазо-, периклазоалюмо-, алюмопериклазо-, доломитоуглеродистых; алюмопериклазовых и алюмошпинельных формованных (безуглеродистых) ковшевых изделий, а также алюмопериклазовых и алюмошпинельных бетонов. При этом существует множество подвидов по содержанию оксидов и углерода, фазовому составу и так далее каждого из этих видов огнеупорных материалов, рекомендуемых для конкретных условий эксплуатации.

Выбор футеровки основывается на множестве факторов — от желания улучшить качество стали, снизить температурные потери металла, увеличить вместимость

ковша или высоту свободного борта, повысить производительность и т. д. до обеспечения безаварийной эксплуатации теплового агрегата. Накоплен достаточный опыт применения указанных огнеупорных материалов в различном сочетании в зависимости от задачи и условий эксплуатации сталеразливочных ковшей. Стремление заказчика снизить удельные затраты на огнеупоры традиционно сосредоточено на оптимизации затрат на футеровку ковшей, как наиболее «огнеупороемкого» агрегата в сталеплавильном производстве, и решается обоснованным выбором как огнеупорного материала,

так и технологии ухода за футеровкой в процессе ее эксплуатации. Экономическая составляющая оценки эффективности использования огнеупоров в футеровке сталеразливочных ковшей все чаще основывается на многофакторном показателе: совокупная стоимость владения огнеупорными материалами (TCO — Total Costto Ownership), который учитывает как прямые, так и косвенные затраты владельца футеровки сталеразливочного ковша. Из этой оценки следует, что не всегда низкая цена на огнеупоры оптимальна с точки зрения влияния на себестоимость конечной продукции.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

## ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧЕГО СЛОЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

(✉)

E-mail: spets@spetsogneupor.ru

© Е. Н. Демин<sup>1</sup>, А. А. Речкалов<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> DEMIN SRM GmbH, г. Мюнхен, Германия

<sup>2</sup> ООО «СпецОгнеупорКомплект», Екатеринбург, Россия

Для повышения температуры эксплуатации рабочего слоя волокнистой теплоизоляции и проведения локального горячего и холодного ремонта футеровки на основе муллитокремнеземистого, магнезиальносиликатного и базальтового волокна разработано и в настоящий момент внедряется защитное покрытие, которое позволяет повысить максимальную рабочую температуру на 300–400 град. Это дает возможность использовать в качестве рабочего теплоизоляционного слоя материалы с более низкой температурой применения (в частности, базальтовую волокнистую теплоизоляцию) там, где обычно используется муллитокремнеземистая, а зону применения муллитокремнеземистой и биорастворимой магнийкальцийсиликатной с максимальной температурой эксплуатации 1150 °С расширить до зоны применения волокнистой футеровки с добавкой ZrO<sub>2</sub> и повышенным содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Известно, что чем выше температура применения волокнистой теплоизоляции, тем выше ее цена, причем на отдельные волокнистые материалы цены могут различаться в разы.

Покрытия изготавливают под конкретные условия эксплуатации и конкретный химический состав футеровки. При нанесении покрытия на футеровку не требуется никакой дополнительной обработки и подготовки поверхности. Покрытие на готовую футеровку наносится пульверизатором или другим удобным инструментом толщиной от 1 до 3 мм и в процессе нагрева увеличивается в объеме в 9–12 раз с образованием пенокерамического защитного слоя. Существенное преимущество разработанного покрытия — возможность его использования в качестве ремонтного материала волокнистой теплоизоляции любого химического состава. При совместном торкретировании с добавками измельченного керамического волокна возможен ремонт изношенных или разрушенных зон теплоизоляционной футеровки толщиной до 300 мм. Кроме того, покрытие улучшает механические свойства самой рабочей поверхности и может быть использовано в тех зонах, в которых применение волокна ограничено скоростью воздушно-газовых потоков.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

## ПЛАСТИЧНЫЕ ПОЛУСУХИЕ МАССЫ КАК НОВЫЙ ВИД НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ

(✉)

E-mail: spets@spetsogneupor.ru

© Е. Н. Демин<sup>1</sup>, В. Г. Савкин<sup>2</sup>, А. А. Речкалов<sup>2</sup> (✉)

<sup>1</sup> DEMIN SRM GmbH, г. Гёрсрид, Германия

<sup>2</sup> ООО «СпецОгнеупорКомплект», Екатеринбург, Россия

Для уменьшения затрат на изготовление новой футеровки и ремонта старой разработана гамма огнеупорных материалов, не требующих громоздкого подготовительного оборудования для изготовления и монтажа футеровки, а также специфических знаний в области технологии огнеупоров. Эти материалы позволяют непрофильным потребителям как изготавливать новую футеровку, так и проводить различные виды локального или капитального ремонта тепловых агрегатов. К таким потребителям можно отнести

деревообрабатывающую, пищевую, сельскохозяйственную отрасли и ЖКХ. Возможно, эти материалы смогут заинтересовать традиционных потребителей — металлургов, машиностроителей, энергетиков, нефтепереработчиков. Авторы предлагают способ изготовления футеровки тепловых агрегатов с применением нескольких видов материалов, предназначенных именно для этого способа. Предлагаемый способ позволяет сделать процесс изготовления футеровки более практичным, технологичным и менее

затратным. Что касается пластичных плотных огнеупорных масс, они поставляются заказчику в готовом виде и не требуют дополнительной подготовки, в том числе увлажнения, перемешивания и других трудоемких операций, связанных с использованием специального оборудования.

ООО «СпецОгнеупорКомплект» производит полусухие пластичные массы влажностью от 7 до 15 % в виде брикетов определенных размеров, согласованных с заказчиком. Главным образом эти пластичные массы используют для ремонта участков сталеплавильных агрегатов в виде оборотовочных масс, ремонтных смесей и защитных обмазок. Поскольку заказы на такую продукцию начали увеличиваться, появился спрос не только на алюмосиликатные материалы, но и на высокоглиноземистые и магнезиальные, было решено поставлять потребителю готовые массы, которые могли бы изготавливаться под требования заказчика и под конкретные условия эксплуатации, о которых потребитель, не имеющий в штате специалистов-огнеупорщиков, может и не знать в силу своей специфики.

Ближайшие перспективы и преимущества масс этого типа:

- возможность использования материалов основного состава, таких как магнезит (периклаз). Кроме того, в качестве заполнителя могут быть использованы алюмомагнезиальная шпинель и хромшпинелиды;

- удобство монтажа футеровки: без опалубки, в горизонтальной или в вертикальной плоскости, не требуется дополнительного оборудования (смеситель, вибраторы);

- график сушки и разогрева как минимум в 2,5 раза короче, чем при футеровании бетоном;

- реальная замена масс на ортофосфорной кислоте типов МК-90, ММКН-90;

- более высокие эксплуатационные характеристики, чем у корундовых масс на жидких фосфатных связующих (термостойкость, теплоизоляционные свойства);

- возможность замены сухих набивных масс для футеровки индукционных печей и исключение из операции выплавляемых или съемных шаблонов.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

### ГЛОБАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛИНОЗЕМОШПИНЕЛЬНОЙ ФУТЕРОВКИ В СТАЛРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

(✉)

E-mail: mail@izometica.ru

© С. Клаус<sup>1</sup> (✉), А. Бур<sup>1</sup>, Дж. Даттон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Компания Almatix GmbH, г. Франкфурт-на-Майне, Германия

<sup>2</sup> г. Стоурбридж, Соединенное Королевство

Разработки в области производства высококачественных сталей, например для автомобильной промышленности, требуют пересмотра состава футеровки сталеразливочного ковша. Наряду с продолжительностью службы футеровки и прямыми затратами на огнеупоры при расчете «совокупной стоимости владения» важное значение приобрели вместимость сталеразливочного ковша, факторы, влияющие на качество стали, и оптимизация энергопотребления. Рассмотр-

но развитие концепции глиноземошпинельной футеровки, а также представлены специфические достоинства современной футеровки сталеразливочного ковша. Недавние события, связанные с наличием и ценообразованием на периклаз из Китая, послужили поводом для дискуссий и проектов, касающихся оценки применения глиноземошпинельных материалов взамен периклазоуглеродистых в футеровке сталеразливочного ковша.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

### ОБЪЕДИНЕННАЯ КОМПАНИЯ KROSAKI AMR REFRACTARIOS – REFRACTARIA (ИСПАНИЯ) — ПОСТАВЩИК ПОЛНОГО СПЕКТРА ВЫСОКОКЛАССНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕЧЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ИЗВЕСТИ

(✉)

E-mail: andrey@cemmet.com

© А. С. Спицин (✉)

Региональный представитель Krosaki AMR Refractarios S.A.u. и Refractaria (Испания), Москва, Россия

Krosaki AMR Refractarios S.A.u. и Refractaria S.A. — обе испанские фирмы с конца 2018 г. формируют единую компанию в составе корпорации Krosaki Harima (Япония), которая входит в число пяти крупнейших мировых производителей огнеупорных материалов. Номенклатура выпускаемой фирмами продукции позволяет предлагать потребителю комплексную поставку, включающую пе-

риклазовые, периклазошпинельные и алюмосиликатные огнеупоры. Благодаря высоким стандартам производства, передовой научной базе и сырьевым материалам высочайшего качества продукция обеих фирм обеспечивает снижение удельного расхода на огнеупоры благодаря достижению существенно более длительного срока службы. Наличие необходимых пресс-форм позволяет производить

изделия для вращающихся печей и вертикальных шахтных печей различного типа.

Наиболее применяемыми марками огнеупоров являются периклазовые E и KB100, периклазошпинельные MX90, MLA и MLS; андалузитовые ANDAL 64E и ANDAL 64SP, бокситовые BERAL, а также материалы с содержанием карбида кремния — CARBAL

10 и CARBAL 1050. Среди заказчиков крупные производители извести и целлюлозно-бумажные комбинаты, включая Lhoist Group (Франция, Испания, Германия), CalcinoGroup (Испания, Марокко, Венгрия), Texas Lime Company Cleburne (США), Nordkalk Koping (Швеция), National Pulp Company of Spain (Испания).

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОНОПЛИТ ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ»  
В ТРЕХПЛИТНЫХ ПОВОРОТНЫХ ЗАТВОРАХ  
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ ММК**

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

(✉)  
E-mail: opitsik@magnezit.com

© К. т. н. М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин, О. Н. Пицик (✉), Е. А. Киселева  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

На Саткинской производственной площадке Группы «Магнезит» освоено производство цельнокерамических плит периклазошпинельного состава. Начиная с 2015 г. периклазошпинельные плиты марки ППш-90, изготовленные на основе плотноспеченного периклаза с массовой долей MgO >98,0 %, успешно эксплуатировались в трехплитных затворах ККЦ ММК. Для улучшения их эксплуатационных показателей разработана технология производства периклазошпинельных моноплит на основе высокочистого плавленого периклаза собственного производства, пропитанных импрегнатом. Огнеупорам присвоена марка ППш-88. Первые промышленные испытания плит марки ППш-88 формата № 3–60 проведены в шиберных затворах сталеразливочных ковшей в условиях ЕВРАЗ НТМК при разливе различных марок стали на МНЛЗ. Плиты показали эксплуатационную надежность на протяжении всего цикла разливок, что позволило рекомендовать их также для применения в шиберных затворах ММК.

В настоящее время моноплиты для трехплитных поворотных затворов производятся полностью на основе собственных исходных материалов высокого качества. Микроструктура разработанных цельнокерамических плит марки ППш-88, по данным петрографического анализа, характеризуется присутствием крупных кристаллов периклаза размерами до 1400 мкм (с преобладанием 600–900 мкм), большим числом

прямых контактов между ними и высоким количеством мелких закрытых пор. Комбинация огнеупорных материалов — высокочистого плавленого периклаза и алюмосодержащего компонента обеспечивает высокую износоустойчивость и минимальную смачиваемость огнеупора расплавом металла в условиях службы. Дополнительным преимуществом плит периклазошпинельного состава является повышенная (по сравнению с периклазовыми огнеупорами) термостойкость — около 4 водяных теплосмен (1300 °С – вода). Среднестатистические показатели пропитанных и термообработанных моноплит марки ППш-88 представлены ниже:

Массовая доля (на прокаленное вещество), %:	
MgO.....	~94,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	~3,8
CaO.....	~1,1
SiO <sub>2</sub> .....	~0,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	~0,5
Массовая доля С, %.....	~1,6
Открытая пористость, %.....	~7,0
Предел прочности при сжатии, МПа.....	~180

По данным мониторинга, обожженные крупноформатные моноплиты марки ППш-88, пропитанные импрегнатом, успешно эксплуатируются в трехплитных затворах промежуточных ковшей ККЦ ММК практически без износа контактной поверхности и сталевыпускных каналов, обеспечивая надежность в процессе разлива стали.

**МЕХАНИЗМ ИЗНОСА ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛИДНЫХ ОГНЕУПОРОВ  
В ФУТЕРОВКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОНВЕРТЕРА ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

(✉)  
E-mail:  
tyarushina@magnezit.com

© К. т. н. Т. В. Ярушина (✉), М. А. Ерошин, А. А. Платонов, В. Б. Федосов  
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Приведены результаты исследования огнеупорных изделий марок ХПП-1 на основе плавленого периклазохромита (шпинелида), ПХП-4 на основе спеченного периклаза с усиленной шпинелидом матрицей и ХПТ-1 на основе спеченного периклаза и хромовой руды производства ПАО «Комбинат «Магнезит» после службы

в горизонтальном конвертере цветной металлургии. Условия эксплуатации были идентичны, огнеупоры располагались в футеровке во время кампании в непосредственном контакте друг с другом. Через 3,5 мес службы конвертера в непрерывном режиме была замерена остаточная толщина футеровки. В зоне, вы-

полненной из изделий марки ХПП-1, футеровка износи-лась на толщину 110–160 мм и составила 330–350 мм. Износ изделий марки ПХП-4 составил 260–295 мм, остаточная толщина 165–200 мм, марки ХПТ-1 — соответственно 285–300 и 160–175 мм.

По данным оптической и электронной микроскопии, износ огнеупоров всех трех марок происходит по общей схеме — скальванием из-за колебания температур во время слива и подачи шлако-штейнового расплава. Возникающие в результате термических напряжений трещины скола в теле огнеупора проходят в основном параллельно рабочей зоне по границе зоны, пропитанной шлако-штейновым расплавом, и наименее измененной зоны. Скальвание происходит из-за различия ТКЛР непропитанного и пропитанного слоев. На толщину пропитанного расплавом слоя влияет эффективность охлаждения футеровки в течение кампании — при недостаточном отводе тепла через кожух конвертера кладка прогревается на большую глубину. Малый градиент температур в рабочем слое футеровки приводит к глубокому проникновению шлако-штейнового расплава в огнеупор (до 70–120 мм), и пропитанная часть изделия скальвается при охлаждении конвертера до температуры ниже 800 °С (температура застывания шлако-штейнового расплава) при сливе металла.

Глубина инфильтрации компонентов шлако-штейнового расплава зависит от качественных ха-

рактеристик огнеупоров, в первую очередь от проницаемости пор и теплопроводности. По сравнению с изделиями марки ХПТ-1 изделия марок ПХП-4 и ХПП-1 характеризуются малым размером эффективных пор и пониженной открытой пористостью. Газопроницаемость изделий марки ХПП-1 составляет 0,151 мкм<sup>2</sup>, размер эффективных пор 5,05 мкм, открытая пористость 11,5 %. Аналогичные показатели у изделий марки ПХП-4 составляют 0,298 мкм<sup>2</sup>, 6,62 мкм и 15,8 % соответственно. При 1300 °С теплопроводность изделий марки ХПП-1 составляет 3,13 Вт/(м·К), марки ПХП-4 — 3,36 Вт/(м·К). Для сравнения: газопроницаемость изделий марки ХПТ-1 0,512 мкм<sup>2</sup>, размер эффективных пор 7,32 мкм, открытая пористость 19,1 %, теплопроводность при 1300 °С 2,51 Вт/(м·К).

Судя по характеру износа и остаточной толщине футеровки после службы в течение 3,5 мес (ресурс футеровки не выработан) разработанные изделия могут успешно применяться в футеровке горизонтального конвертера цветной металлургии, но в отличие от изделий марки ХПТ-1 изделия марок ПХП-4 и ХПП-1 менее подвержены коррозии на контакте со шлако-штейновым расплавом (химическое взаимодействие периклазовой составляющей с фаялитом с образованием вторичных минералов, таких как форстерит, магнезиоферрит) и насыщению оксидами железа.

