

**20–21 МАЯ
2021 ГОДА**

МОСКВА, НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ОГНЕУПОРЩИКОВ И МЕТАЛЛУРГОВ



МАГНЕЗИТ
вместе созидать

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Беляков А. В., Церман С. И. Влияние обрабатываемости хрупкого неметаллического материала на выбор оптимальной структуры алмазного инструмента.....	6
Беляков А. В., Церман С. И. Металломатричные композиционные материалы в сегментах алмазных инструментов для интенсивной механической обработки хрупких неметаллов.....	7
Берсенева И. С., Вохмякова И. С., Брагин В. В. Технологические возможности повышения стойкости футеровки при производстве железорудного сырья.....	7
Борзов А. Н. Моделирование высоты слоя материала при переходе с ленточного на кольцевой конвейер.....	8
Гилязова И. Р., Солдатов А. И., Боровик С. И. Связующее для углеродных композиционных материалов на основе терморасширенного графита.....	8
Гладких И. В. Промышленные отходы как источник минерального техногенного сырья для производства алюмосиликатных материалов.....	9
Дацко И. А., Данилова Ю. В., Мухамадеев Н. Е. Ресурсосберегающие технологии производства неформованных огнеупоров.....	10
Дзюзер В. Я. Расчет структуры футеровки канала питателя стеклоформирующей машины.....	10
Дмитриев А. И., Григорьев А. С., Шилько Е. В., Андреев К. Развитие формализма метода дискретных элементов для динамического анализа разрушения и прогнозирования состояния огнеупорных материалов при термомеханическом воздействии.....	11
Заболотский А. В., Хадыев В. Т., Мигашкин А. О., Турчин М. Ю. О характере разрушения огнеупоров рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей.....	12
Зубащенко Р. В. Исследование кинетики помолы кальцинированного глинозема.....	12
Кийк А. А., Кормина И. В. Брикетирование углеродсодержащих материалов.....	13
Колесников С. А. Дискретно-гетерогенный механизм прогрева анизотропных огнеупорных материалов и повышение их термопрочности.....	13
Котенко А. А., Чугунова И. А. Экзотермические вставки — влияние на производственный процесс.....	15
Кушнерев И. В., Кочу А. В., Платонов А. А. Термодинамическое моделирование химического износа огнеупорных изделий рабочей футеровки вельц-печи.....	15
Марочкин О. А. Контролируемые потоки стали в промежуточных ковшах МНЛЗ.....	16
Словиковский В. В., Гуляева А. В. Огнеупорные изделия с регулируемой теплопроводностью, не подверженные температурному сколу.....	17
Чистякова Т. Б., Новожилова И. В., Козлов В. В. Электронная информационно-образовательная среда для подготовки специалистов в области ресурсосберегающего и экологически безопасного управления сталеплавыльным конвертерным процессом.....	17
Шилько Е. В., Дмитриев А. И., Коноваленко И. С., Григорьев А. С. Моделирование деформации и разрушения водонасыщенных хрупких пористых материалов композиционного состава при динамических механических и термических воздействиях.....	18
Шьяртано С. Умный дизайн желобов доменной печи от TRB.....	19
Юрков А. Л., Малахо А. П., Авдеев В. В. Материалы на основе терморасширенного графита.....	19
Эшлок С., Лебедев И. В. Мировой опыт применения кианита и муллита из Вирджинии (США) в огнеупорных материалах.....	19

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

Данилов Д. В., Данилова О. Ю., Кулёмина Г. И., Попов О. А., Ушакова Н. В. Служба карбидкремниевых изделий производства ОАО «Волжский абразивный завод».....	20
Дацко И. А., Мигашкин А. О., Данилова Ю. В. Огнеупорные бетоны для патрубков циркуляционных РН-вакууматоров.....	21
Денисов Д. Е., Некрасова О. К. Бетоны с регулируемой плотностью и бетоны на кремнезольных связующих — особенности применения.....	22
Ерошин М. А., Марченко Д. А., Фахрутдинова М. Р. Магнезитовый тиксотропный бетон марки MAGCAST P88 и изделия на его основе MAGSTONE P88.....	23

Зубащенко Р. В. Теория и практика получения конструкционно-теплоизоляционных термостойких изделий системы $Al_2O_3-SiO_2$ с низкой теплопроводностью.....	23
Зубащенко Р. В., Кузин В. И. Пенокерамический алюмосиликатный наполнитель.....	24
Красный Б. Л., Иконников К. И., Лемешев Д. О., Галганова А. Л., Сизова А. С. Огнеупорные теплоизоляционные материалы, полученные с использованием техногенного сырья — легких алюмосиликатных компонентов летучей золы.....	24
Лейтзел Т., Махоски Дж., Шгойер К., Тейлор Р., Дьячек Т. А., Шуклинов А. В. Циркониевые огнеупоры компаний Zircoa, Inc. и Dyson Technical Ceramics для МНЛЗ, производства металлических порошков и для других областей применения.....	25
Манашев И. Р., Манашева Э. М. Опыт производства и применения композиционных антиоксидантов на основе нитридов по СВС-методу в углеродсодержащих огнеупорах.....	26
Мигашкин А. О., Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А. Огнеупоры Группы «Магнезит» для агрегатов внепечной обработки стали.....	27
Сакулин А. В., Гершкович С. И., Иксанов Ф. Р., Михайлов Д. А., Витовский А. В., Мусевич В. А., Никитин А. А. Тонкостенная керамика АО БКО.....	28
Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Поспелова Е. И. Масса Группы «Магнезит» для рабочего слоя футеровки промежуточных ковшей.....	28

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

Давыдов С. Я. Решение проблем перемещения горячих грузов в контейнерах.....	29
Давыдов С. Я., Макаров В. Н., Апакашев Р. А., Макаров Н. В., Кожушко Г. Г. Бустерное устройство для перемещения и подъема сыпучих материалов.....	30
Катаев А. В., Пономарев В. Б., Постовой И. В. Разработка промышленного воздушного сепаратора для замкнутого цикла измельчения ванадиевого шлама.....	30

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Абызов В. А., Посаднова Н. Е. Применение отходов шамотного производства в технологии жаростойкого фосфатного газобетона.....	31
Абызов В. А., Черногорлов С. Н. Жаростойкий вермикулитобетон на глиноземистом вяжущем, модифицированном шлаком ферротитана.....	32
Антипов М. С., Прокопец А. Д., Столин П. А., Бажин П. М. Разработка металлокерамического материала на основе карбида титана для повышения стойкости шибберных затворов.....	32
Антонович В., Зданявичюс П., Стонис Р., Спудулис Э., Корякин А., Шахменко Г., Татаринев А. Исследование деструкции жаростойкого шамотного бетона при его резком нагреве и охлаждении.....	33
Апакашев Р. А., Давыдов С. Я., Хазин М. Л., Красиков С. Н. Исследование взаимодействия кварцевого огнеупора с алюминием и его сплавами.....	33
Бейлина Н. Ю., Петров А. В., Стариченко Н. С. Взаимодействие сырьевых компонентов в коксопелковых композициях.....	34
Белогурова О. А., Саварина М. А., Шарай Т. В. Форстеритовый бетон из техногенных отходов Ковдорского ГОКа.....	35
Беляев И. В., Киреев А. В., Шалаев Н. И., Люхтер А. Б., Жокин А. В., Рыков В. В. Лазерная резка плазменно-напыленных огнеупорных изделий из оксида алюминия.....	35
Беляев И. М., Истомин П. В., Истомина Е. И., Лысенков А. С. Получение керамики из химически модифицированного карбида тантала.....	36
Беляев И. М., Истомин П. В., Истомина Е. И., Лысенков А. С., Надуткин А. В., Грасс В. Э. Получение керамики на основе кремнийсодержащих МАХ-фаз из лейкоксенового концентрата.....	36
Бражник Д. А., Гурина Г. И., Смирнова М. В. Термодинамические основы разработки технологий изготовления периклазуглеродистых материалов на фенолоформальдегидной смоле и активирующих добавках.....	37
Бубенков И. А., Кошелев Ю. И., Волков В. В., Вербец Д. Б., Чеблакова Е. Г., Сапожников В. И., Синец Д. Ю. Новый силицированный графит класса СГМ для применения в металлургии.....	37

Гилев В. Г., Оглезнева С. А., Каченюк М. Н., Сметкин А. А. Синтез МАХ-фазы Ti_2AlN искровым плазменным спеканием из смеси Ti/AlN	38	Рева В. П., Ягофаров В. Ю., Назаренко А. А., Титова В. А. Влияние углеводородной атмосферы на синтез карбида гафния.....	52
Голобурда Е. В., Козлов В. В. Огнеупорный материал высокоглиноземистого состава для футеровки сталеразливочных ковшей.....	39	Руденко Л. П., Суворов С. А., Румянцев В. И. Взаимодействие нитрида бора с титаном в системе $B-N-Ti$	53
Гусаров С. В., Подболотов К. Б., Хорт Н. А. Разработка алюмосиликатных и глиноземистых бетонных изделий для тепловых агрегатов.....	39	Руми М. Х., Ирматова Ш. К., Файзиев Ш. А., Уразаева Э. М., Мансурова Э. П., Зуфаров М. А. Получение легковесных материалов с использованием отходов ТЭС.....	53
Дякин П. В., Пивинский Ю. Е. ВКВС композиционного состава в системе спеченный глинозем BSA 96–ВДКС.....	40	Севергина Е. А., Козлов В. В. Оксидциркониевая пористая керамика, полученная методом химического вспучивания.....	54
Земляной К. Г., Коньков Д. Д., Муфтеева Л. Ф., Гиренко Г. С., Павлова И. А. Высокопористые ячеистые катализаторы для очистки выхлопных газов.....	41	Соков В. Н. Теплоизоляционный вибропрессованный корунд.....	55
Истомина Е. И., Истомин П. В., Надуткин А. В., Грасс В. Э., Беляев И. М. Карбосиликотермическое восстановление оксидов переходных металлов IV–V групп.....	41	Солдатов А. И., Боровик С. И., Гилязова И. Р. Оценка факторов, влияющих на степень извлечения фенола при регенерации углеродного сорбента.....	56
Кардашова Г. Д., Пашук Е. Г., Халилов Ш. А. Получение керамического композита на основе карбида кремния методом искрового плазменного спекания и его упругие свойства.....	42	Суворов Д. С., Хайдаров Б. Б., Лысов Д. В., Казаков В. И., Горчаков В. В., Кузнецов Д. В. Влияние добавок нанодисперсного диоксида кремния на структурные и физико-механические характеристики огнеупорной керамики.....	57
Кашцев И. Д., Гетман А. А., Обрубова А. П., Фарафонтон Е. П., Павлова И. А. Высокоглиноземистый шамот на основе отходов производства плавяного корунда.....	43	Суворов С. А., Козлов В. В. Влияние технологических параметров конвертерной плавки на процессы износа футеровки.....	58
Кашцев И. Д., Глызина А. Э., Ивачева Н. Д. Неформованные теплоизоляционные материалы для металлургической промышленности.....	43	Суворов С. А., Козлов В. В. Моделирование процесса обезуглероживания оксидно-углеродистых материалов.....	58
Козлов В. В. Высокопористые и ультрапористые огнеупорные материалы, полученные методом химического вспучивания.....	44	Суворов С. А., Козлов В. В. Промышленные испытания карбонированных шпинельнокорундовых изделий в сталеразливочных ковшах.....	59
Козлов В. В., Иванов А. В. Программный комплекс для оптимизации химического и фазового составов сталеплавильных шлаков.....	44	Суворов С. А., Козлов В. В., Арбузова Н. В. Обезуглероживание карбонированных шпинельнокорундовых огнеупоров.....	60
Кривобородов Ю. Р., Потапова Е. Н., Дмитриева Е. А., Бурлов И. Ю. Высокоалюминатные низкоцементные огнеупорные бетоны на основе техногенных отходов.....	45	Уголков В. Л., Ломанова Н. А., Осипов А. В. Синтез поликристаллического материала на основе титаната висмута $Bi_2Ti_2O_{11}$	60
Кривобородов Ю. Р., Потапова Е. Н., Дмитриева Е. А., Бурлов И. Ю. Получение высокоалюминатных низкоцементных огнеупорных бетонов с использованием техногенных отходов ООО «Тулачермет-Сталь».....	45	Уразаева Э. М., Руми М. Х., Мансурова Э. П., Ирматова Ш. К., Файзиев Ш. А., Зуфаров М. А., Арушанов Г. М. Отработка технологии легковесных огнеупоров на основе традиционных сухарных каолиновых глин и отходов их обогащения.....	61
Ломанова Н. А. Синтез и термическое поведение сложных перовскитоподобных оксидов $Bi_{5-x}Ca_xFeTi_3O_{15-6}$	46	Чижиков А. П., Константинов А. С., Антипов М. С., Бажин П. М., Столин А. М. Получение полевых стержней на основе алюмомагнезиальной шпинели и диборида титана методом СВС-экструзии.....	62
Мартыненко В. В., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А., Мишнева Ю. Е. Высокоогнеупорная особоплотная корундовая керамика, полученная различными методами формования.....	46	Шабанов Ш. Ш., Кардашова Г. Д. Исследование структуры и теплофизические свойства керамики $SiC-AlN$	62
Мартыненко В. В., Кущенко П. А., Примаченко В. В., Шулик И. Г., Мишнева Ю. Е., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А. Корундохромоксидцирконийсиликатные огнеупоры, содержащие 60 % Cr_2O_3 , с повышенной коррозионной стойкостью к расплавам стекла Е и базальта для печей производства стекловолокна.....	47	Шабанова Г. Н., Корогодская А. Н., Мокрицкая В. К., Школьникова Т. В. Цирконийсодержащие бетоны высшей огнеупорности.....	63
Мартыненко В. В., Кущенко П. А., Шулик И. Г., Гальченко Т. Г., Процак Е. Б. Высокоогнеупорные изделия из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, для установок выращивания монокристаллов.....	47	Шмурадков В. Т., Пантелеенко Ф. И., Бородавко В. И., Реут О. П., Бендик Т. И., Кизимов А. Н., Клавкина Н. В. Принципиальный подход разработки – исследования – создания электроизоляторов разного технического назначения.....	64
Мартыненко В. В., Кущенко П. А., Шулик И. Г., Золотухина Л. Н. Корундошпинельные пробки для донной продувки стали в сталеразливочных ковшах.....	48	Шуклинов А. В., Дмитриевский А. А., Жигачева Д. Г., Васюков В. М., Жигачев А. О., Дьячек Т. А., Ефремова Н. Ю., Овчинников П. Н. Композиционная керамика на основе диоксида циркония, обладающая запасом пластичности и стойкостью к низкотемпературной деградации.....	65
Мигашкин А. О., Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Заболотский А. В. Вертикальные трещины в сталеразливочных ковшах как фактор преждевременного вывода из эксплуатации. Успешно реализованные решения.....	49	Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А. Огнеупоры для футеровки свода ферросплавной печи.....	65
Павлова И. А., Глызина А. Э., Ивачева Н. Д., Савенков Н. И. Производство керамических изделий из диатомита Ильинского месторождения.....	49	Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А. Способ повышения высокотемпературной эластичности коксовой структуры огнеупоров состава $MgO-C$	66
Перепелицын В. А., Остряков Л. В., Острякова И. В., Пивинский Ю. Е. Шлакоустойчивость керамобетонных желобных масс системы $Al_2O_3-SiC-SiO_2-C$ в восстановительной среде.....	50	Ярушина Т. В., Турчин М. Ю., Ерошин М. А., Мигашкин А. О. Зависимость стойкости $MgO-C$ -огнеупоров шлакового пояса сталеразливочных ковшей от количества раскисляющей добавки ферромарганца.....	67
Примаченко В. В., Мартыненко В. В., Шулик И. Г., Кущенко К. И., Крахмаль Ю. А., Ткаченко Л. П. Применение новых сырьевых материалов в технологии муллитокорундовых огнеупоров.....	51		
Прокопец А. Д., Чижиков А. П., Константинов А. С., Бажин П. М., Столин А. М. Микроструктура и свойства слоистого композиционного материала $TiV/TiAl/Ti-6Al-4V$, полученного методом свободного СВС-сжатия.....	51		

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

Гончаров Э. В. Монолитная футеровка горна доменных печей из бесцементных огнеупорных бетонов марки Metpump® компании Magneco/Metrel.....	68
Зуев М. В., Мурзин А. В., Зубаков Л. В., Жилин А. М., Булатов Р. Н. Передовые технологии эксплуатации футеровки дуговой сталеплавильной печи на Северском трубном заводе.....	69
Немсадзе Г. Г., Джоджуа Р. А., Смирнов А. Н., Рыбий Д. В., Шарандин К. Н. Разработка магнезиальной саморастекающейся массы GIR-RB-X для горячего ремонта футеровки конвертера.....	70
Словиковский В. В., Гуляева А. В. Эффективное применение глиссажных труб.....	71

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

E-mail: cs@deltaplant.ru

ВЛИЯНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ХРУПКОГО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА© Д. х. н. **А. В. Беляков**¹, **С. И. Церман**²¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия² ООО «Дельта» группы компаний «Адель», Москва, Россия

Металломатричные алмазные композиционные материалы (АКМ) состоят из пластичной металлической основы (матрицы) и наполнителя в виде зерен алмазов. Функциональным назначением таких материалов является разрушающее механическое воздействие алмазных зерен на обрабатываемые хрупкие неметаллические материалы (ХНМ). Подход к режущему слою алмазного инструмента как к композиционному материалу (КМ) упрощает оптимизацию его конструктивных параметров для обеспечения эффективного резания разнообразных ХНМ. Те из конструктивных параметров АКМ, которые связаны с алмазами их количеством, свойствами, размером и их расположением в слое, определяют структуру КМ. Широкое разнообразие физико-механических свойств и структуры ХНМ затрудняет выбор параметров для создания универсального инструмента. Однако если поделить всю гамму ХНМ по сложности обработки на группы, то для каждой из них можно конструировать инструменты, универсальные в пределах этих групп.

Обрабатываемость ХНМ можно оценивать формально по комбинации их физико-механических свойств. Можно принять за основу методику определения степени трудоемкости при резании горных пород. Ее определяют как комбинацию показателей, связанных с твердостью материала и его прочностью. Эти показатели будут аддитивными, учитывая свойства слагающих материал фаз и наличие в образцах пор. Классификация ХНМ по обрабатываемости и практика их механической обработки позволяют условно выделить две группы материалов: легкообрабатываемые (абразивные) и труднообрабатываемые (неабразивные). В данном случае абразивность и неабразивность относятся к образующимся продуктам обработки (шламу). Эти группы охватывают основные промышленные материалы. Примеры легкообрабатываемых и труднообрабатываемых материалов можно представить, например, в виде таких пар: шамот–бакор в огнеупорах, травертин–гранит в камнеобработке, «свежий» бетон–прочный бетон в стройиндустрии. В настоящей работе рассмотрены схемы расположения алмазов (структуры) и предло-

жены оптимальные для обработки различных групп ХНМ.

В соответствии с классификацией КМ простейшей структуре АКМ соответствует свободное распределение алмазов. Степень равномерности распределения алмазных зерен обеспечивается качеством технологии изготовления. Для такой структуры АКМ характерны значительные промежутки между режущими зернами, и она энергетически эффективна при обработке легкообрабатываемых материалов, поскольку каждое зерно производит в них большой объем разрушений. Показано, что с усложнением обрабатываемости ХНМ каждое зерно производит меньше разрушений. В этом случае эффективность процесса резания обеспечивается за счет реализации разных вариантов слоистых структур КМ. Простейшим «слоистым» структурированием является чередование алмазосодержащих и безалмазных слоев в АКМ. Концентрация алмазов в слоях при сохранении общей концентрации растет, пропорционально увеличивается и концентрация разрушений, а разрушения от соседних алмазных слоев складываются, облегчая процесс резания. К варианту слоистой структуры можно отнести чередование слоев с повышенной и пониженной концентрацией алмазов («сэндвич-структуры»). В качестве варианта слоистой структуры сегментов можно привести упорядоченное расположение алмазов, связанное с укладкой алмазных зерен в слоях по специальным схемам. Эффективность этой структуры обеспечивается увеличением концентрации активных режущих центров в инструменте. Слоистые структуры чаще всего применяют для средне- и труднообрабатываемых материалов.

Как показывает практика, для труднообрабатываемых материалов высокую эффективность демонстрируют структуры, связанные с замещением отдельных зерен на режущие агрегаты с высокой концентрацией алмазов. Структура из агрегатов взамен зерен может быть воспроизведена по любой из схем, описанных выше. Такой инструмент осуществляет двойное резание: индивидуальными алмазами и алмазными агрегатами, создавая максимальное разрушение.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
В СЕГМЕНТАХ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОЙ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛОВ**(✉)
E-mail: cs@deltaplant.ru© Д. х. н. **А. В. Беляков**¹, **С. И. Церман**² (✉)¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия² ООО «Дельта» группы компаний «Адель», Москва, Россия

Металломатричные композиционные материалы (КМ) имеют пластичную металлическую основу — матрицу и неметаллические наполнители, выполняющие армирующие или иные функции. Примером являются алмазные инструменты, содержащие алмазные зерна, распределенные в металлической матрице. Традиционно алмазные композиционные материалы (АКМ) применяют для обозначения материалов с чрезвычайно высоким содержанием алмазных зерен. Их применяют в качестве вставок для монокристаллического инструмента в резцах, волоках, в буровых коронках и долотах. Однако многокристалльный алмазный инструмент некоторые авторы также рассматривают как АКМ и применяют к нему конструктивные требования, характерные для композитов. Такой общий подход помогает оптимизировать состав, конструкцию и технологию изготовления инструмента.

Алмазный инструмент предназначен для разрушающего механического воздействия на хрупкие неметаллические материалы (ХНМ), которое осуществляют алмазными режущими зернами, поэтому важнейшее значение при этом имеют их характеристика и расположение в матрице инструмента. Для интенсивной обработки применяют преимущественно металлическую матрицу, армируемую дополнительными наполнителями. В соответствии с классификацией КМ простейшей структурой АКМ является равномерное распределение алмазов. Этой структуре соответствует технология формования сегментов, включающая равномерное перемешивание компонентов. Однако такой инструмент требует значительных энергозатрат для интенсивной обработки. Более эффективный процесс обработки связан с вариантами слоистой структуры сегментов, простейший из них — чередование слоев с разной концентрацией алмазов. За счет разной скорости износа слоев режущая поверхность принимает специфический профиль, который обеспечивает более интенсивное разрушение ХНМ. Помимо чередования слоев в них изменяют еще и состав матрицы. Это позволяет экономить количество алмазов. Технология формования сегментов усложняется применением кратной засыпки шихты для

прессования. В качестве еще одного из вариантов слоистой структуры сегментов можно привести так называемое упорядоченное расположение алмазов, связанное с укладкой алмазных зерен в слои. Эта технология требует специального оборудования. Эффективность слоистой структуры обеспечивается значительным увеличением концентрации активных режущих центров на поверхности инструмента.

Рассмотренные варианты структуры АКМ связаны с размещением индивидуальных алмазных зерен. Нами предложена двухуровневая структура режущего слоя. Первый структурный уровень связан с концентрацией алмазных зерен в отдельных агрегатах в рамках рабочего слоя (во фрагментах), второй — с распределением этих агрегатов в «несущей» металлической матрице, которая их прочно удерживает. Такое расположение алмазов обеспечивает два уровня резания: на первом оно производится режущими зернами, на втором — режущими фрагментами, что повышает эффективность резания. Технология изготовления таких сегментов сводится к равномерному перемешиванию гранул режущих модулей со связкой для несущей матрицы в пропорциях, соответствующих заданной конструкции сегмента. Эти пропорции в первом приближении нами предложено определять при помощи специального склерометрического теста на конкретных материалах.

Для фрагментных АКМ, как и для материалов из отдельных алмазов, можно создавать слоистые структуры с чередованием слоев или с упорядоченным расположением фрагментов. Технологические приемы для их изготовления аналогичны описанным выше. Дополнительное размещение в таких эффективных структурах гранул, содержащих специальные модифицирующие добавки, регулирующие процесс резания, позволяет сочетать в сегментах не только высокие режущие свойства и ресурс, но и адаптацию инструмента к конкретным материалам и оборудованию. Такие названные нами «умные сегменты» внедрены в производство и находят применение при механической обработке огнеупоров, природного камня, бетона.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ
ФУТЕРОВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ**(✉)
E-mail: i.bersenev@torex-npvp.ru© К. т. н. **И. С. Берсенева** (✉), **И. С. Вохмякова**, **В. В. Брагин**

ООО «НПВП ТОРЭКС», Екатеринбург, Россия

От стойкости футеровки зависят продолжительность кампании обжиговой машины и затраты на ремонт, поэтому задача повышения срока службы футеровки является актуальной для всех производителей ока-

тышей. Цель настоящей работы — демонстрация возможностей улучшения условий эксплуатации футеровки за счет технологических мероприятий. Следует отметить, что положительный эффект для футеровки

достигается попутно с главной целью производства — достижением высокого качества продукции.

Производство магниевых окатышей. При добавке магния в офлюсованные окатыши МГОК им. А. В. Варичева улучшаются прочностные свойства окатышей за счет изменения их минеральной структуры. В результате можно снизить максимальную температуру в горне обжиговой машины на 20–30 °С и уменьшить износ футеровки при неизменном качестве окатышей.

Использование извести в окатышах. При добавке извести в шихту офлюсованных окатышей из магнетитового концентрата достигается снижение расхода тепла на обжиг. Соответственно за счет этого можно уменьшить длительность высокотемпературного обжига при температуре выше 1250 °С на 2–3 мин и оптимизировать тепловую работу футеровки — снизить длительность ее работы при наиболее высоких температурах.

Использование бария и стронция в титаномагнетитовых окатышах. При добавке барий-стронциевой руды в шихту титаномагнетитовых окатышей достигаются снижение температуры образования расплава и за счет этого уменьшение расхода тепла на обжиг. Использование этого эффекта возможно как для повышения прочности окатышей, так и для снижения максимальной температуры в горне обжиговой машины на 10–30 °С и износа футеровки при неизменном качестве окатышей.

Использование прибора «Термологгер» для контроля режима термообработки. Одна из причин неравномерного износа футеровки — нерациональный газодинамический режим в рабочем пространстве печи. С использованием прибора «Термологгер» можно определять неравномерность температурного поля по ширине и высоте слоя и далее разрабатывать технические решения для снижения этой неравномерности. В результате возможны улучшение качества окатышей, а также уменьшение потерь тепла и износа футеровки.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРЕХОДЕ С ЛЕНТОЧНОГО НА КОЛЬЦЕВОЙ КОНВЕЙЕР

(✉)

E-mail: aborzov@magnezit.com

© К. т. н. **А. Н. Борзов** (✉)

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

Представлена математическая модель движения гранулированного материала по конвейерной ленте, ковшовому элеватору, нагревательному загрузочному бункеру и поду вращения. Анализ движения материала позволяет выявить зависимость скорости и высоты материала в вышеуказанных агрегатах от их конфигурации, скоро-

сти движения ленты конвейера и фракционного состава материала. Понимание высоты материала ведет к пониманию вопросов первичного нагрева материала в нагревательном загрузочном бункере и начальной температуры материала на входе во вращающемся поде, а также оптимального управления сгорания газа в горелках.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

СВЯЗУЮЩЕЕ ДЛЯ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

(✉)

E-mail: s2305028@yandex.ru

© **И. Р. Гилязова**, к. т. н. **А. И. Солдатов**, к. т. н. **С. И. Боровик** (✉)

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

Повышение требований к качеству продукции металлургического производства приводит к необходимости поиска новых материалов для создания огнеупорных изделий, в том числе на основе углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), которые за счет химических свойств углерода обладают высокой термостойкостью и выдерживают высокие температуры. Изготовление УУКМ на основе терморасширенного графита (ТРГ) имеет ряд преимуществ. ТРГ обладает высокой пористостью и свойством формоваться даже без связующего. В чистом виде из него можно формовать разные материалы (например, фольгу). Однако механическая прочность формованных изделий из ТРГ без связующего невысока, поэтому для повышения прочности в УУКМ вводят пек, фенолоформальдегидные смолы и т. д. Пек обладает высоким сродством к поверхности ТРГ

за счет подобию строения частиц пека, что позволяет обеспечить высокие прочность и теплостойкость УУКМ, изготовленных на основе ТРГ.

Для изучения возможности использования пека в качестве связующего была исследована адсорбция фракций каменноугольного пека на поверхности ТРГ. Установлено, что адсорбция γ -фракции носит линейный характер и при повышении температуры уменьшается, т. е. адсорбция носит, предположительно, физический характер. По кинетическим кривым адсорбции γ -фракции рассчитан тепловой эффект реакции, который находится в пределах 10–50 кДж/моль. Отмечено, что изотермы адсорбции β -фракции также носят линейный характер, однако повышение температуры, при которой проводили адсорбцию β -фракции, не оказывает существенного влияния на адсорбцию и не смещает адсорбционное равно-

весе. По-видимому, это обусловлено крупным размером частиц β -фракции, за счет чего и происходит их прочное сцепление с поверхностью ТРГ. Изотерма адсорбции α_2 -фракции при комнатной температуре может быть выражена в виде степенной зависимости с областью отрицательных значений, что свидетельствует о конкурентном характере адсорбции. Из-за диффузионно-кинетических ограничений первыми подходят и адсорбируются на поверхности ТРГ более мелкие молекулы растворителя. С увеличением концентрации α_2 -фракции молекулы растворителя постепенно вытесняются, и кривая адсорбции выходит в положительную область. Повышение температуры адсорбции хотя бы в 2 раза нивелирует конкурентный характер адсорбции, и изотерма адсорбции принимает линейный характер.

Для более полного контроля адсорбции фракций пека на поверхности ТРГ были сняты ИК-спектры фракций пека до и после адсорбции на ТРГ. Выявлено, что из γ -фракции в первую очередь будут адсорбироваться циклоалканы, содержащие 6 и более атомов углерода в цикле. Адсорбция высококонденсированных ароматических соединений наблюдается на ИК-спектрах β -фракции, что указывает на высокое сродство частиц β -фракции к поверхности ТРГ. Независимость адсорбционного равновесия от температуры и высокое сродство к углеродной поверхности β -фракции, состоящей преимущественно из высококонденсированных ароматических структур, позволяют предположить, что наиболее предпочтительным связующим для УУКМ на основе ТРГ является каменноугольный пек с высоким содержанием β -фракции.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ КАК ИСТОЧНИК МИНЕРАЛЬНОГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

✉

E-mail: annagladkih78@mail.ru

© К. т. н. **И. В. Гладких** ✉

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», кафедра металлургических технологий и оборудования, Нижний Новгород, Россия

Сложившаяся практика в области образования и обращения с отходами является одной из наиболее острых экологических проблем Российской Федерации. В стране ежегодно образуется более 5 млрд т отходов, основная масса (92 %) которых приходится на горнодобывающую отрасль, 5,6 % на предприятия черной и цветной металлургии, 0,5 % на теплоэнергетику. Общая величина накопленных отходов оценивается примерно в 120 млрд т; при этом подавляющая часть отходов располагается в Сибирском (> 57 %) и Уральском (22 %) федеральных округах. В многочисленных разновидностях заскладированных отходов имеются неорганические вещества и материалы, которые могут быть использованы в качестве техногенного сырья для производства огнеупорной продукции. Для выявления степени пригодности и выбора направления использования такого рода сырья разработана методологическая схема, по которой рекомендуется проводить поэтапную оценку качества техногенного сырья по следующим критериям: объему образования, экологической безопасности, химико-минеральному составу и технологическим показателям.

В результате проведенной по предложенным критериям оценки установлено, что основным компонентом для изготовления алюмосиликатных материалов является огнеупорный наполнитель на основе лома шамотных изделий, представляющий собой среднетоннажное (> 106 тыс. т в год), нетоксичное (V класс опасности) синтетическое техногенное сырье следующего химического состава, мас. %: Al_2O_3 33,22, SiO_2 51,60, Fe_2O_3 1,05, CaO 0,53, TiO_2 1,20, MgO 0,57, $Na_2O + K_2O$ 3,13, $\Delta m_{прк}$ 8,60. Фракционный состав наполнителя мельче 1 мм, средний размер частиц 0,469 мм, огнеупорность 1690 °С.

Существенным резервом алюмосиликатного сырья может стать также огнеупорная глина вскрышных пород угольных месторождений. Это среднетоннажное (900 тыс. т в год), нетоксичное, среднепластичное ($\Pi = 21 \div 29$), полукислое ($Al_2O_3 + TiO_2 = 31,48$ %), огнеупорное (огнеупорность 1450 °С) техногенное сырье, сохранившее природные свойства. Химический состав глины, мас. %: SiO_2 52,92, Al_2O_3 30,80, Fe_2O_3 0,10, CaO 0,30. Основная масса частиц (76,2 %) имеет крупность менее 0,2 мм, средний размер частиц 0,11 мм.

Ценным техногенным сырьем для производства вяжущих материалов (высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий и жидкого стекла) является микрокремнеземистая пыль производства ферросилиция. Пыль представляет собой нетоксичное минеральное активное (содержание аморфного SiO_2 до 93 %), ультрадисперсное (крупность частиц < 1,98 мкм, удельная поверхность 20000–22000 м²/кг, насыпная плотность 200–250 кг/м³) синтетическое техногенное сырье.

Перспективным тугоплавким кальцийсодержащим техногенным сырьем является саморассыпающийся шлак электросталеплавильного производства. Содержание в шлаке до 70 % двухкальциевого силиката (γ - $2CaO \cdot SiO_2$) предопределяет возможность его использования в качестве добавки, повышающей термостойкость огнеупорных материалов, а также компонента, обеспечивающего процессы схватывания и твердения смесей на основе жидкого стекла. Шлак представляет собой среднетоннажный (160 тыс. т в год), нетоксичный (IV класс опасности), тонкодисперсный (удельная поверхность 1400 м²/кг, крупность частиц 1–10 мкм) материал. Массовая доля CaO в шлаке более 45 %, SiO_2 менее 20 %, что характеризует отход как высокоосновный ($B = 3,4$).

На основе исследованного техногенного сырья разработаны составы и по технологии керамобетона с «плавающим» каркасом получены алюмосиликатные материалы, соответствующие маркам ШБ, ШВ и ШУС по ГОСТ 390–96. Разработанные материалы пористостью 24–26 % с пределом прочности при

сжатии 18–25 МПа, термостойкостью 12 водяных теплосмен, огнеупорностью 1660 °С могут быть рекомендованы в качестве альтернативных материалов для футеровки тепловых агрегатов металлургического производства с максимальной температурой службы 1350 °С.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ

✉
E-mail: idatsko@magnezit.com

© **И. А. Дацко** ✉, **Ю. В. Данилова**, **Н. Е. Мухамадеев**
ООО «Группа «Мagneзит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Природное сырье является неотъемлемой частью любого огнеупорного производства. Неважно, идет ли речь о собственных месторождениях или же о закупных материалах. В то же время одним из наиболее негативных воздействий на экологию является складирование и хранение отработавших огнеупорных материалов. В процессе службы огнеупорные материалы подвергаются износу и в большинстве случаев после эксплуатации отработавшая футеровка превращается в отходы, ежегодно повышающие нагрузку на окружающую среду. Вопрос вовлечения вторичного сырья в производство остро стоит как у металлургов, так и у производителей огнеупоров. Группа «Мagneзит» участвует в разработке ресурсосберегающих технологий, основанных на применении вторичного огнеупорного сырья. За последние годы были разработаны и освоены технологии производства бетонных и торкрет-масс, содержащих до 67 % вторичного огнеупорного сырья. Вторичное огнеупорное сырье может быть представлено как отходами потребителей огнеупорной продукции (лом футеровки, металлургические шлаки и т. д.), так и производителей огнеупорных материалов, кото-

рые образовались при ремонте собственных тепловых агрегатов. На сегодняшний день в России отношение к материалам, содержащим рециклинг, неоднозначное. Принято считать, что рециклинг представляет собой загрязненный, некачественный материал. На самом деле, это не так. Современные агрегаты для дробления, классификации, обогащения и очистки позволяют получать качественное вторичное сырье, пригодное для применения в огнеупорном производстве.

Специалистами Группы «Мagneзит» за последние годы разработана продукция, основанная на рециклинге огнеупорных материалов, в частности, бетоны и торкрет-массы от шамотного состава до высокоглиноземистого. Основным потребителем этого вида продукции может стать цементная промышленность. Продукты, выполненные с применением вторичного огнеупорного сырья, по свойствам зачастую ни в чем не уступают продуктам из природного сырья. А поскольку рециклинговые материалы даже с учетом дополнительных переделов очистки и классификации намного дешевле природных, можно говорить о том, что рынок огнеупоров из вторичного сырья ждет большие перемены.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ ФУТЕРОВКИ КАНАЛА ПИТАТЕЛЯ СТЕКЛОФОРМУЮЩЕЙ МАШИНЫ

✉
E-mail: vdzuzer@yandex.ru

© **В. Я. Дзюзер** ✉
ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Канал питателя стеклоформирующей машины предназначен для студки и термической гомогенизации расплава перед выработкой. Студку стекломассы осуществляют путем естественного и принудительного охлаждения. Естественное охлаждение стекла обусловлено теплопередачей через футеровку канала. Потери теплоты в окружающую среду пропорциональны градиенту температур, минимизация которого является основным условием повышения термической однородности расплава в канале. Поэтому основным способом воздействия на теплосодержание стекломассы является ее принудительное охлаждение: радиационное и/или конвективное (воздушное). При производительности

канала 60–140 т/сут снижение температуры от 1250 до 1100–1150 °С достигается при потере теплоты в окружающую среду 83–194 кВт, что составляет около 9 % теплосодержания расплава на входе в канал.

В результате охлаждения динамическая вязкость стекломассы в канале питателя превышает 100 Па·с. Поэтому течение вязкого расплава в узкой ванне изначально создает условия для термической неоднородности. Они обусловлены как неравномерным полем скоростей, так и потерями теплоты через боковые стенки и дно ванны. В результате возникают поперечные (> 0,1 °С/мм) и вертикальные (> 0,08 °С/мм) градиенты температур. Для управления процессом гомогениза-

ции расплава канал оснащают системами охлаждения и нагрева. Их автономная и/или совместная работа позволяет управлять термической однородностью стекла и температурой капли в наборной чаше. Термическую однородность стекломассы характеризуют индексом термической однородности (THI — Thermal Homogeneity Index). Как правило, принимают $\text{THI} \geq 96\%$. Для расчета параметра THI используют 9-точечную матрицу температуры. В процессе эксплуатации канала она определяется посредством трех трехуровневых термопар, установленных определенным способом, на выходе из канала. На стадии проектирования канала матрица температур определяется расчетом теплопередачи в окружающую среду. Теплообмен в движущейся стекломассе является нестационарным. Поэтому для расчета матрицы температур в фиксированном поперечном сечении канала требуется задание условий однозначности. Они включают граничные и начальные (временные) условия, геометрию канала и структуру его футеровки, а также теплофизические свойства расплава и компонентов кладки дна и стенок ванны. Граничные условия отображают взаимодействие стекломассы с окружающей средой, а начальные условия устанавливают распределение температуры в расплаве в начальный момент времени. Понятно, что точное решение задачи предполагает применение методов трехмерного математического моделирования.

В то же время при разработке структуры футеровки канала представляется возможным отделить процессы теплообмена от процессов охлаждения и нагрева стекломассы. В этом случае расчет теплопередачи в окружающую среду выполняют по уравнению одномерной стационарной теплопроводности при смешанной постановке граничных условий I и III рода. При этом в соответствии с диффузионной трактовкой процесса излучения теплообмен в слое расплава рассматривают как кондуктивный теплообмен. Отсюда следует, что в качестве граничного условия I рода может быть задана средняя температура поверхности стекломассы на оси канала. К граничным условиям III рода относят температуру окружающей среды и коэффициент суммарной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки. Диффузионное приближение предусматривает использование в расчетах теплопередачи эффективной теплопроводности стекломассы.

Начальная термическая неоднородность стекломассы на входе в канал соответствует $\text{THI} \sim 85\%$. Энергоэффективная структура футеровки канала, характеризуемая термическим сопротивлением $1,6 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$, позволяет в 1,3–1,5 раза снизить градиент температуры и довести индекс THI до 93 %. Использование системы отопления пристенных участков поверхности расплава позволяет достичь требуемой величины: $\text{THI} \geq 96\%$.

РАЗВИТИЕ ФОРМАЛИЗМА МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

(✉)

E-mail: shilko@ispms.tsc.ru

© Д. ф.-м. н. А. И. Дмитриев^{1,2}, А. С. Григорьев¹, д. ф.-м. н. Е. В. Шилько^{1,2} (✉), К. Андреев³

¹ ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Россия

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

³ Ceramic Research Centre, Tata Steel, Ijmuiden, Netherlands

Огнеупорные материалы, используемые, в частности, для футеровки металлургических агрегатов или литейных форм, являются композиционными и характеризуются многоуровневой поровой структурой. В процессе эксплуатации огнеупоры подвергаются интенсивным термическим и механическим нагрузкам, которые вызывают температурные напряжения и деформации. Дополнительным источником опасных (растягивающих) внутренних напряжений в этих условиях могут быть флюиды в поровом пространстве материала. Такими флюидами являются расплавы металла или шлака, а также водяные пары, которые выделяются при сушке и разогреве огнеупорных бетонов. Поровый флюид, нагреваемый до высоких температур за малые промежутки времени, существенно увеличивает поровое давление и может вносить тем самым значимый вклад в изменение локального напряженно-деформированного состояния материала и даже инициировать его локальное или макроскопическое разрушение. Поэтому выявление особенностей

микро- и мезомасштабных механизмов локального разрушения огнеупорных материалов при разных параметрах термомеханических нагрузок (и наличии поровой жидкости) актуально для создания аналитического инструментария прогнозирования эксплуатационных характеристик.

Привлекательным инструментом такого изучения на мезомасштабном уровне служит компьютерное моделирование с использованием методов дискретных элементов (DEM). Авторами разработана одна из наиболее эффективных реализаций этого метода — метод однородно деформируемых дискретных элементов (метод подвижных клеточных автоматов). На основе этого метода для численного анализа механизмов локального разрушения пористых огнеупоров при термомеханическом нагружении развита двухуровневая термомеханическая модель пористого композиционного материала, которая учитывает:

– особенности кинетики локального разрушения высоко-, низко-, беспористых областей материала;

– термически индуцированные изменения удельного объема и/или локальных напряжений в рамках приближения линейной термоупругости, а также кондуктивный теплоперенос;

– термомеханическое взаимовлияние твердофазного каркаса и порового флюида (при его наличии) на основе модели линейной термопоупругости Био, а также перераспределение флюида в поровом пространстве.

Возможности развитого дискретно-элементного подхода показаны на примере мезомасштабного моделирования механического поведения нескольких пористых огнеупорных материалов, в том числе спеченного оксида кремния тяжелого бетона. Разрабо-

танная численная модель этих материалов учитывает два пространственных масштаба структуры: мезо- и микромасштабный. Мезомасштабные элементы внутренней структуры задавались явным образом. Особенности внутренней структуры микромасштабного уровня учитывались параметрически (интегрально) через эффективные физико-механические свойства. С применением построенной дискретно-элементной модели показаны особенности (в том мезомасштабные механизмы) разрушения огнеупорных материалов при интенсивных динамических и термических воздействиях. Показаны различия механизмов разрушения при воздействии разной природы, а также влияние порового флюида.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

О ХАРАКТЕРЕ РАЗРУШЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

(✉)

E-mail: azabolotskiy@magnezit.com

© К. т. н. А. В. Заболотский¹ (✉), В. Т. Хадыев², А. О. Мигашкин², к. т. н. М. Ю. Турчин²

¹ ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Разрушение конструкционных материалов может происходить по двум механизмам, описывающим предельные случаи реакции твердых тел на механическое (в том числе термомеханическое воздействие) хрупкое и вязкое разрушение. В первом случае имеет место нарастание внутренних напряжений в материале, вплоть до критической величины с последующим развитием сквозных катастрофических трещин, во втором — возрастание нагрузки приводит к пластическим деформациям и снижению внутреннего напряжения, но ценой утраты первоначальной геометрической формы изделия.

Огнеупоры и керамика при низких температурах показывают свойства, близкие к свойствам хрупких тел, однако вследствие неоднородной структуры часто реализуется механизм не катастрофического, а усталостного хрупкого разрушения, характеризующийся постепенным продвижением трещин между зёрнами и порами материала. При повышенной температуре, которая может быть определена при испытании материалов по ГОСТ 4070–2014, возникают в том числе пластические составляющие, изменяющие характер разрушения материалов, снижающие опасность реа-

лизации хрупкой схемы повреждения и возникновения сквозных дефектов футеровки.

Вследствие того что эксплуатация огнеупоров происходит зачастую при температуре, соответствующей возможным пластическим деформациям, разные зоны футеровки демонстрируют различные реакции на механическое воздействие. Как правило, при резком охлаждении футеровки (термическом ударе) происходит формирование участков, подверженных хрупкому механизму разрушения вблизи рабочей поверхности футеровки и на некотором удалении от нее вглубь материала. Расчет положения и момента формирования этих зон может быть выполнен с применением программных комплексов, реализующих метод конечных или дискретных элементов, например ANSYS Fluent и ANSYS Mechanical.

Данное исследование проводится Группой «Магнезит» в рамках работ по повышению стойкости материалов для футеровки сталеразливочных ковшей и представляет практический интерес для расчета безопасного времени перерыва после разлива металла до приема новой плавки или времени транспортировки агрегата после разлива на стенд нагрева.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПОМОЛА КАЛЬЦИНИРОВАННОГО ГЛИНОЗЕМА

(✉)

E-mail: zroman7777@mail.ru

© К. т. н. Р. В. Зубашенко (✉)

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

На процесс спекания влияют разные технологические факторы, позволяющие в практических условиях регулировать скорость и степень спекания. Большое влияние на спекание оказывают размер зерен порошкообразного тела и их распределение по размерам. Кроме того, применение исходных материалов в так

называемом активном состоянии, т. е. имеющих далекую от равновесной сильно искаженную решетку позволяет повысить скорость спекания (и реакционную способность).

Исследовали кинетику сухого помола кальцинированного глинозема фирмы Nabaltec (Германия) разных

марок. Измельчение осуществляли в промышленной шаровой мельнице с корундовыми мелющими телами. Известно, что аморфизация при помоле наблюдается в первую очередь у материалов с высокой твердостью и хрупкостью. В них подводимая энергия не успевает рассеиваться. Система вынуждена значительную ее часть аккумулировать внутри себя на создание внутренних дефектов. Установлено, что процесс измельчения глинозема можно разделить на три стадии: разрушение исходных зерен материала (кальцинированный глинозем представлен агломератами, сложенными от-

дельными кристаллами Al_2O_3), вторичная агломерация и механическое активирование. На первых двух стадиях энергия затрачивается на разрушение агрегатов частиц, на стадии активации — на повышение дефектности структуры. С помощью лазерного анализатора размеров частиц (Analysette 22 NanoTec plus) и рентгеновского дифрактометра (ARL X'TRA) определили влияние длительности помола, применения различных ПАВ (поверхностно-активных веществ), а также режима работы мельницы на гранулометрию и тонкую структуру молотого кальцинированного глинозема.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

БРИКЕТИРОВАНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

(✉)

E-mail: 79221112200@yandex.ru

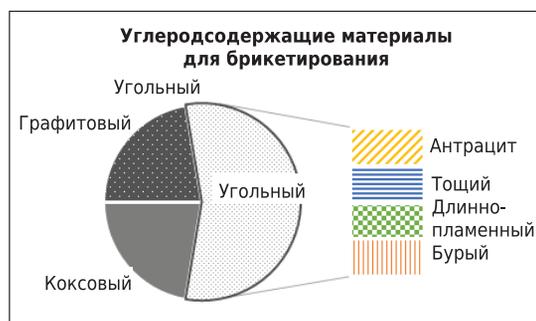
© А. А. Кийк (✉), И. В. Кормина

ООО «Полипласт-УралСиб», НТЦ по разработке связующих для металлургической, горнодобывающей, горно-перерабатывающей промышленности, Екатеринбург, Россия

Все возрастающие объемы мелких некондиционных отходов (от добычи угля, металлургического и коксохимического производства) побуждают к окускованию углеродсодержащих материалов. Рассмотрены разные способы получения окускованного материала с помощью брикетирования (виброформованием, валковым прессованием, вакуумной экструзией) широкого спектра углеродсодержащих материалов (см. рисунок).

В лаборатории брикетирования предприятия «Полипласт-УралСиб» накоплен большой опыт в данном направлении; имеются практические наработки. Работа главным образом основывается на анализе материала для брикетирования, имеющегося технологического оборудования и требованиях, предъявляемых к брикету. Для этого имеются смесительное оборудование, прессовые агрегаты, испытательные устройства.

На примере антрацитов двух месторождений (см. таблицу) показано влияние связующих на физико-механические свойства брикетов.



В зависимости от состава и свойств антрацита конкретного месторождения, вида связующего, его расхода процессе брикетирования строго индивидуален. Ответственный подход к выбору технологии брикетирования, использованию подходящего вида связующего обеспечивают конкурентоспособное экономически обоснованное и технологичное производство.

Вид связующего	Дозировка связующего, %	Формовочная влажность, %	Испытание брикетов при выдержке			
			5 мин		1 сут	
			сброс, количество раз	влажностойкость	сброс, количество раз	влажностойкость
<i>Антрацит Кузнецкого бассейна (влажность 10 %)</i>						
ТД 021.005.СВ	1,0	18,0	6	+	27	+
ТД 000.049.СВ	0,5	22,5	5	+	30	+
<i>Антрацит Донецкого бассейна (влажность 3,5 %)</i>						
ТД 021.005.СВ	2,5	6,0	7	-	35	+
ТД 000.049.СВ	0,5	8,5	5	+	7	+
ТД 000.151.СВ	2,5	9,0	7	+	12	+

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

ДИСКРЕТНО-ГЕТЕРОГЕННЫЙ МЕХАНИЗМ ПРОГРЕВА АНИЗОТРОПНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОВЫШЕНИЕ ИХ ТЕРМОПРОЧНОСТИ

(✉)

E-mail: skolesnikov02@mail.ru

© Д. т. н. С. А. Колесников (✉)

АО «НИИГрафит», Москва, Россия

Необходимым условием выполнения рабочих функций огнеупорных материалов на начальном этапе скоростного теплового воздействия является их сопротивление термическому удару. В настоящем до-

кладе рассматриваются результаты численных оценок термической прочности для многомерно армированных углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ).

Любые формы критериев эффективности (K_T) коэффициента термостойкости являются формой записи оценки запаса прочности (n), являющимся отношением предела прочности при растяжении $[\sigma]$ к действующим термическим напряжениям ($\sigma_{действующая} = \alpha_T E \Delta T$).

$$K_T = n = \frac{[\sigma]}{\alpha_T E \Delta T}.$$

Наиболее известен в практическом использовании критерий условного параметра термостойкости при записи по Кинджери для стационарных условий эксплуатации

$$K_2 = \frac{[\sigma] \lambda}{\alpha E}. \quad (1)$$

Для учета тепловых процессов отражения части тепловой энергии в окружающее рабочее пространство при скоростном нагреве известно выражение коэффициента термостойкости

$$R_{\Delta T \text{var } iabl} = \frac{[\sigma](1 - \nu) \sqrt{\lambda C_p \gamma}}{(1 - \epsilon) \alpha_T E}, \quad (2)$$

где ϵ — степень черноты поверхности изделия; C_p — удельная теплоемкость материала; ν — коэффициент Пуассона; γ — плотность материала изделия.

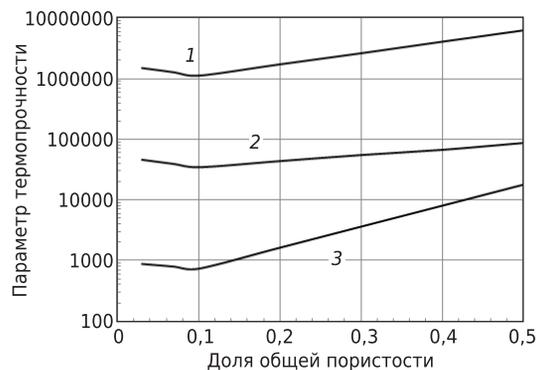
Для материаловедческого обоснования оптимальных границ технологического процесса рассматривается также облик критерия в виде, который является ядром в каждом случае применения огнеупорных материалов:

$$K_1 = \frac{[\sigma]}{\alpha E}. \quad (3)$$

Критерий термостойкости в настоящем виде введен в приемо-сдаточную документацию трехмерно-армированного УУКМ при выпуске серийной продукции АО «НИИГрафит».

Исследовано формирование основных физико-механических и теплофизических свойств материалов, необходимых для численных оценок согласно выражениям (1)–(3). Исследования проведены в процессе уплотнения углеродной матрицы в интервале пористости примерно от 0,5 до 0,04. Результаты численной оценки зависимости критерия термостойкости на основе экспериментальных свойств материала трехмерно-армирования от открытой пористости композита показаны на рисунке. В поле рисунка показаны расчетные выражения: 1 — для $K_2 = \frac{[\sigma] \sqrt{\lambda C_p \gamma}}{(1 - \epsilon) \alpha E}$; 2 — для K_2 , уравнение (1); 3 — для K_1 , уравнение (3).

В области высокой пористости материала его модуль упругости относительно мал и это является



основной причиной высоких показателей условного критерия термостойкости. Как видно из рисунка, можно определить критическое значение кажущейся плотности (открытой пористости), которое обеспечит стабильную эксплуатацию огнеупорной детали из УУКМ. Для УУКМ на основе матрицы из каменноугольного пека и углеродного волокна из ПАН найдено граничное значение плотности не менее 1800 кг/м³ при общей пористости не более 0,1 для надежного выполнения материалом функции стойкой к термическому удару стенки в конструкционных огнеупорных изделиях.

Полученные оценки для УУКМ следует считать минимальными. Показано, что механизм прогрева рабочих поверхностей деталей из УУКМ имеет дискретно-гетерогенный механизм. Углеродные армирующие волокна, существенно превосходящие углеродную матрицу по степени текстурирования, модулю упругости, скорости прохождения звука в продольном направлении и температуропроводности, в опережающей последовательности транслируют тепловой поток в объем детали. В результате в материале будут отсутствовать резкие термические границы. При этом термомеханические напряжения в конструкции, макронапряжения в композите с переменными свойствами и структурные микронапряжения усредняются с общим уменьшением наиболее опасных для эксплуатации детали — конструкционных напряжений для УУКМ.

Аналогичный механизм повышения термостойкости возможен и для других типов огнеупорных композиций с значительной разностью температуропроводности компонент. К таким композитам могут относиться, например, материалы C-SiC с высокотекстурированными углеродными волокнами (с модулем упругости > 400 ГПа) или композиты керамической природы с армированием высокотеплопроводной медной сеткой.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ВСТАВКИ — ВЛИЯНИЕ
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС**

(✉)

E-mail: chugunova_i@mail.ru

© А. А. Котенко¹, к. т. н. И. А. Чугунова² (✉)¹ ООО «ЕТМ», г. Воронеж, Россия² ООО «ЕвроТехМет», г. Воронеж, Россия

Объем производств отливок в мире растет, доля России в производстве снизилась за последние десять лет в 2 раза. Более 50 % потребления литья формируется автомобильной промышленностью; отрасли станкостроения, тяжелого машиностроения, а также энергетическая и нефтегазовая вместе составляют около 30 % производства. По мере развития производства отливок необходимо расширять возможности отечественного литейного машиностроения. Обогрев прибылей экзотермическими вставками является наиболее эффективным и распространенным способом повышения выхода годного, улучшающим питание отливок.

В рамках реализации программы Правительства России по импортозамещению компания «ЕвроТехМет» освоила производство экзотермических вставок. Это позволит занять российский рынок более чем на 25 %. В настоящее время экзотермические вставки проходят испытания на предприятиях «ОМЗ — Литейное производство», «Гусар», «Копейский машзавод», ПО «Бежичская сталь», «ВКМ-Сталь РМ РЕЙЛ», «Шахтинский завод Гидропривод», РУСТ-95. Оптимальный состав экзотермических вставок зависит от толщины отливки или теплового узла, так как при небольшом объеме прибыли с металлом, имеющим небольшой запас тепла и малую степень перегрева, экзотермическая реакция должна начинаться как можно раньше. Чтобы устранить преждевременное затвердевание металла в прибыли или, наоборот, на крупных прибылях при заливке сплава с большим запасом тепла и с большим перегревом, нужно увеличить время до начала реакции. Кроме того, важную роль играет скорость горения, которая должна регулироваться в зависимости от приведенной толщины прибыли.

В результате проведенных исследований разработаны составы с разным содержанием основных компонентов. Установлено, что увеличение содержания алюминиевого порошка повышает температуру горения и снижает температуру воспламенения. Криолит заметно снижает температуру воспламенения и повышает скорость горения. Медленное распространение волны горения увеличивает длительность контакта реагента

в высокотемпературной зоне, что обеспечивает длительность горения вставки. Максимальную температуру горения, развивающуюся во вставках, измеряли цифровым бесконтактным пирометром Impras IS 320 с последующей обработкой на персональном компьютере с помощью программы InfraWin, которая выдает графическую зависимость температуры от времени. Определяли точку, в которой температура начинает интенсивно повышаться, т. е. температуру воспламенения экзотермической вставки.

Распространенным газовым дефектом при производстве отливок являются внутренние газовые раковины в теле отливки, источником которых служат газы, выделяемые при нагреве формы. Газотворность изделий зависит от химической природы связующего и его содержания. Количество связующей композиции определяли в процессе экспериментальных исследований. Установлено, что более газопроницаемы вставки, в которых в качестве связующего использовали жидкое стекло. Нижний предел смоляного связующего поднят до 6,0 %, при котором предел прочности при сжатии и газотворность изделий удовлетворяют требованиям потребителя. Газотворность определяли по ГОСТ 23409.12.78 на специальной установке.

Компания производит:

– *отсекательные кольца* из плакированных смесей на основе кварцевого песка и хромитового концентрата. Отсекательные кольца приклеиваются к вставке и поставляются в комплекте. Используется технология по Hot Box-процессу — при этом отверждение происходит в стержневой оснастке, нагретой до 200 град. Использование отсекальных колец на экзотермических вставках позволяет не только намного легче и эффективнее отделять прибыли от отливок, но и получить качественную поверхность отливок;

– *экзотермические смеси марки Tismet Exomix* на базе химически твердеющей связующей композиции, которые позволяют снизить затраты и длительность технологического цикла. При разработке состава смесей учитывали влияние вида наполнителя на прочностные и теплофизические свойства экзотермических смесей.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ИЗНОСА
ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАБОЧЕЙ ФУТЕРОВКИ ВЕЛЬЦ-ПЕЧИ**

(✉)

E-mail: ikushnerrev@magnezit.com

© К. т. н. И. В. Кушнерев¹ (✉), А. В. Кочу², А. А. Платонов²¹ ООО «Группа «Магнезит», Москва, Россия² ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

При производстве цинка после выщелачивания обогащенного концентрата образуется так называемый кек, содержащий до 23 % цинка, который целесообразно извлекать. Для этой цели используют вельцевание

во вращающейся печи. Процесс вельцевания кеков основан на восстановлении и возгонке цинка из его оксидов твердым углеродом при 1100–1300 °С и последующим окислении паров цинка кислородом воздуха.

В связи с увеличением требований потребителя к стойкости футеровки вельц-печи провели термодинамический анализ вариантов решения поставленной задачи с точки зрения химического износа хромитопериклазовых и периклазохромитовых изделий. Расчеты выполняли в пакете программ FactSage 7.0. Результаты термодинамических расчетов показали, что в целом с точки зрения химического взаимодействия ни один вид предложенных к рассмотрению огнеупоров магнезиального состава не имеет выраженных преимуществ перед другими. Комплексная оценка огнеупорных изделий требует привлечения информации о свойствах огнеупоров, позволяющих характеризовать кинетику пропитки изделий расплавом сырьевой смеси. В этой связи авторы обратились к вопросу регулирования открытой пористости. Одной из возможностей является использование пропитки огнеупорных изделий солями.

Провели термодинамический анализ стабильности эпсомита. Вещество при температурах службы огнеупоров диссоциирует на оксид и газ. В соответствии с известной концепцией (Аксельрод, Л. М. [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2018. — № 4. — С. 78–88), частицы оксида при проникновении шлака в поры могут поступать в него, оказывая влияние на вязкость. Расчетная оценка предела насыщения сырьевой смеси MgO при температуре эксплуатации вельц-печи показала, что, начиная с массовой доли оксида магния 0,11, происходит выделение оксидного твердого раствора, т. е. достигается насыщение шлака и возрастает его гетерогенность. Расчеты вязкости подтверждают эти выводы.

Таким образом, при близкой склонности к химическому износу огнеупоров разных марок может быть рекомендовано проведение мероприятий по снижению открытой пористости и, в частности, пропитке изделий эпсомитом для снижения проникновения компонентов сырьевой смеси.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПОТОКИ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНЛЗ

(✉)

E-mail: m_a_r_chel74@mail.ru

© К. т. н. **О. А. Марочкин** (✉)

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

Моделирование оптимальных параметров разливки позволяет определить конструктивные размеры новых элементов промежуточного ковша (приемных камер, перегородок, «бойных» зон), обеспечивающих снижение турбулентности в потоках стали при выпуске ее из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш через защитную трубу.

Получение равномерно распределенных потоков стали в промежуточном ковше приводит к стабилизации процессов, связанных с интенсивным эрозионным износом слоя футеровки на границе шлак–металл. Однако снижение турбулентных потоков приводит к уменьшению естественного переноса неметаллических включений к поверхности ванны промежуточного ковша и ее ассимиляции с покрывным слоем шлакообразующей смеси. Эти включения при переносе к границе шлак–металл стремятся к последующему интегрированию с шлакообразующей смесью, поэтому необходимо создание контролируемых вихревых потоков жидкой стали в промежуточном ковше, которые обеспечат доставку неметаллических включений к шлакообразующим смесям без увеличения эрозионного износа (интенсивности износа) футеровки и огнеупорных изделий.

Баланс получения этих величин, может быть достигнут:

- получением контролируемого (задаваемого) вихревого потока прохождения жидкой стали в промежуточный ковш, проектируемого при помощи математического моделирования и программных продуктов на его основе, в котором предусмотрены изменение скоростных потоков в сталевыпускных отверстиях и изменение геометрических параметров огнеупорных изделий, оказывающих непосредственное влияние на эти потоки;
- применением материала укрывных шлакообразующих смесей в промежуточном ковше, сопоставимого с его огнеупорным материалом футеровки (торкрет-массы);
- изменением уровня погружения защитной трубы сталеразливочного ковша — расстояния между нижней частью защитной трубы и поверхностью «бойной» плиты приемника промежуточного ковша при изменении его рабочего уровня.

Таким образом, задаваемый поток позволит оптимизировать комплексный подход к выбору шлакообразующих смесей, огнеупорных материалов и сталепроводки промежуточных ковшей без снижения их стойкости и качества непрерывнолитого слитка.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

✉

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ, НЕ ПОДВЕРЖЕННЫЕ ТЕМПЕРАТУРНОМУ СКОЛУ© К. т. н. **В. В. Словиковский**, **А. В. Гуляева** ✉

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Авторами рассмотрено повышение стойкости футеровки тепловых агрегатов за счет применения огнеупорных изделий оптимальной конструкции, обладающих регулируемой теплопроводностью, не подверженных температурному сколу и исключающих выпадение скастов футеровки в процессе службы. Такие изделия целесообразно использовать в вельц-печах и сводах металлургических агрегатов. Теплоизоляционный слой состоит из огнеупорного материала и искусственных пор, которые образуются при прессовании изделий. Потери тепла через футеровку уменьшает также паз для закладки дополнительной теплоизоляции: каолиновой ваты, асбестового волокна и др. Огнеупорные изделия специальной конструкции могут быть прессованными и обожженными по традиционной технологии хромитовых, периклазовых, периклазохромитовых изделий, а также изготовленными по технологии огнеупорных бетонов. Разработанные изделия могут применяться

в наиболее изнашиваемых частях футеровки — в сводах металлургических агрегатов: мартеновских, РТП, электропечей, КИВЦЭТных агрегатов, печей Ванюкова. Применение этих изделий целесообразно также в кладке стен сталеразливочных ковшей, в футеровке установок печь-ковш, так как позволяет исключить теплоизоляционный шамотный окат футеровки, уменьшить случаи выпадения огнеупорных изделий при эксплуатации ковшей.

Авторами разработаны специальные огнеупорные изделия с регулируемой пористостью, обладающие специальным зацепом, исключающим выпадение изделий при службе. Разработанные фурменные блоки уменьшают количество швов в фурменном поясе в 9 раз и имеют высокие показатели физико-механических свойств. Фурменные блоки рационально использовать также в шпуровых узлах РТП вместо стандартных изделий.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

✉

E-mail: nov@technolog.edu.ru

ЭЛЕКТРОННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕГО И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМ КОНВЕРТЕРНЫМ ПРОЦЕССОМ© Д. т. н. **Т. Б. Чистякова**¹ ✉, к. т. н. **И. В. Новожилова**¹, к. т. н. **В. В. Козлов**²¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра систем автоматизированного проектирования и управления, Санкт-Петербург, Россия² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия

С развитием системы экологического менеджмента металлургических предприятий возрастает актуальность комплексного управления жизненным циклом сталеплавильных производств с учетом требований экологической безопасности, интенсификации процессов вторичной переработки сырья и материалов, а также снижения отходоёмкости производства. Ключевыми экологическими показателями предприятий металлургической промышленности являются: комплексный индекс загрязнения атмосферы, удельное водопотребление, а также уровень переработки отходов (шлаков, пыли, шламов). Ведущую промышленную группу металлургических производств составляет конвертерное производство, что связано с высокой производительностью конвертеров, высоким уровнем автоматизации технологических процессов и гибкостью технологии плавки, позволяющей получать сталь высокого качества и широкого сортамента. Конвертерное производство представляет собой сложный комплекс физико-химических и тепловых процессов, отличающихся многообразием материалов, постоянным изменением их состава и температуры, а также многофакторными взаимодействиями и связями, воз-

никающими по ходу процесса. Трудности управления конвертерным процессом связаны с работой в условиях недостаточной текущей информации о параметрах процесса (например, нечеткой информацией о химическом составе лома), действием случайных возмущений (например, загрязнение лома ржавчиной и посторонними материалами) и строгими требованиями к экологическим показателям производства.

Один из инструментов ресурсосбережения производства — развитие системы кадрового обеспечения металлургических предприятий, которая позволит на базе внедрения инновационных технологий комплексно управлять созданием металлопродукции с улучшенными экологическими и потребительскими свойствами. Таким образом, создание электронной среды для подготовки специалистов в области ресурсосберегающего и экологически безопасного управления конвертерным процессом является актуальной и практически значимой задачей.

Задачу управления конвертерным процессом можно сформулировать следующим образом: на основании входных данных о химическом составе и параметрах шихты, шлакообразующих материалов, требуемом

составе и температуре металла необходимо определить допустимые значения управляющих воздействий (объема и времени дутья), обеспечивающие заданное качество стали, с условиями минимизации расхода периклазоуглеродистого огнеупора в рабочем слое футеровки конвертера и выполнения экологических требований по выбросам углекислого газа и количеству образующегося шлака. Для решения этой задачи основу среды составляют две подсистемы: подсистема интеллектуального анализа производственных данных для прогнозирования качественного состава стали, закономерностей разрушения футеровки конвертера и агрессивности шлакового расплава на базе нейронной сети, а также подсистема для расчета материального и теплового баланса конвертерной плавки с использованием детерминированных математи-

ческих моделей. Среда позволяет выявлять сложные нечеткие взаимосвязи между параметрами процесса и выдавать рекомендации по управлению, а именно: определению режимов дутья конвертерной плавки для повышения выхода жидкой стали, улучшению шлакового режима плавки, повышению качества выплавляемой стали, уменьшению тепловых потерь, повышению стойкости футеровки конвертера, рециклингу конвертерного шлака, экономии шлакообразующих материалов, а также снижению выбросов в окружающую среду. Применение среды на металлургических предприятиях позволяет повысить профессиональный уровень управленческого производственного персонала за счет глубокого понимания причинно-следственных связей конвертерного процесса, увеличения уверенности и самостоятельного решения задач управления.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

✉

E-mail: shilko@ispms.tsc.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ХРУПКИХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ© Д. ф.-м. н. **Е. В. Шилько**¹ ✉, д. ф.-м. н. **А. И. Дмитриев**¹, к. ф.-м. н. **И. С. Коноваленко**^{1,2}, **А. С. Григорьев**¹¹ ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН), г. Томск, Россия² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

Часть огнеупорных материалов, используемых, в частности, для футеровки металлургических агрегатов или литейных форм, по своей структуре являются композиционными и характеризуются многоуровневой поровой структурой. Вследствие особенностей технологии получения изделий из этих материалов (в том числе при нарушении технологии или условий эксплуатации) их поровое пространство может содержать некоторое количество жидкости. При интенсивных механических и термических воздействиях на эти материалы (например, при контакте с расплавленным металлом) в них образуются значительные температурные напряжения и деформации. Поровая жидкость, нагреваемая до высоких температур за малые промежутки времени, существенно увеличивает поровое давление и тем самым может вносить существенный вклад в изменение локального напряженно-деформированного состояния материала. При малом количестве жидкости в огнеупорном материале она способствует образованию повреждений, которые, однако, не приводят к катастрофическим разрушениям и нарушению работы изделия. Однако в случае водонасыщенного материала влияние поровой жидкости может становиться сопоставимым с собственно термическими напряжениями в каркасе и инициирует макроскопическое хрупкое разрушение материала, приводя к отказам в работе изделия, авариям и убыткам. Таким образом, исследование механического поведения и разрушения пористых водосодержащих теплоустойчивых и огнеупорных материалов при интенсивных термомеханических воздействиях — важная научная задача, имеющая большую практическую значимость. Проведение экспериментальных исследований,

направленных на получение оценки вклада поровой жидкости в напряженно-деформированное состояние пористого каркаса и условие разрушения, является достаточно сложной задачей. Поэтому в настоящей работе эта задача решалась в рамках компьютерного моделирования методом дискретных элементов.

Для решения задачи на основе развиваемого авторами метода однородно-деформируемых проницаемых дискретных элементов развита двухуровневая связанная термомеханическая модель пористого водосодержащего композиционного материала. Модель учитывает: а) механическое взаимовлияние поровой жидкости и твердофазного каркаса, а также перераспределение жидкости в поровом пространстве материала; б) температурное расширение каркаса и порового флюида, а также кондуктивный перенос тепла в каркасе и перенос тепла фильтрующейся жидкостью. В качестве примера пористого композиционного материала рассмотрен тяжелый бетон. Разработанная численная модель бетона учитывает два пространственных масштаба структуры: мезоскопический и микроскопический. В рамках модели рассматриваются образцы (представительные объемы) бетона мезоскопического масштаба. Мезомасштабные элементы внутренней структуры бетона (агрегаты, микропоры) задавались явным образом. Особенности внутренней структуры микромасштабного уровня учитывались параметрически (интегрально): через физико-механические свойства цементного камня, агрегатов и порового флюида. Эти свойства включают применяемые определяющие соотношения и уравнения динамики для компонентов системы, а также конкретные значения коэффицици-

ентов и параметров этих соотношений и уравнений. Перераспределение жидкости в поровом объеме образца описывается классическим уравнением транспорта плотности. Связь локального порового давления и напряженно-деформированного состояния твердofазного каркаса дискретного элемента описывается на основе модели пороупругости Био.

С применением построенной дискретно-элементной модели проведены предварительные рас-

четы, позволившие выявить критическое содержание поровой жидкости и ее влияние на прочность, а также особенности разрушения огнеупорных материалов при интенсивных динамических и термических воздействиях. В частности, обсуждается возможность построения обобщенных кривых динамического значения прочности водонасыщенного бетона при механическом и термомеханическом нагружении от безразмерного параметра, аналогичного числу Дарси.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

УМНЫЙ ДИЗАЙН ЖЕЛОБОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ TRB

(✉)

E-mail: schiartano@trb.fr

© Симон Шьяртано (✉)
Компания TRB, Франция

В данной работе представлен глобальный обзор дизайна главного желоба доменной печи. Большой опыт и профессионализм специалистов компании TRB позволяют разработать наилучшую концепцию желоба с использованием следующих

инновационных инструментов: «умный» дизайн блоков арматурного слоя, тепловое и термомеханическое цифровое моделирование, замеры термомпарами, инфракрасные тепловизоры, лазерный 3D-сканер.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

(✉)

E-mail: and-yur@mail.ru

© Д. т. н. А. Л. Юрков (✉), к. х. н. А. П. Малахо, д. х. н. В. В. Авдеев
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

В традиционном понимании углеродные материалы для металлургии — это крупногабаритные изделия (электроды, аноды, катоды и доменные блоки). Материалы на основе терморасширенного графита тоже начинают находить применение у металлургов. В графите атомы в слое связаны прочными ковалентными связями, связь между сетками слоев осуществляется слабыми ван-дер-ваальсовыми силами. Благодаря такому строению кристалла появляется возможность разным молекулам и атомам при определенных условиях проникать в межслоевое пространство. Плоские углеродные сетки чередуются со слоями внедренного вещества (интеркалята). В результате такого взаимодействия образуются интеркалированные соединения графита (ИСГ), переходящие в окисленный графит. Для получения терморасширенного графита использу-

ются серная и азотная кислоты. При термоударе коэффициент расширения окисленного графита составляет 40–80, соответственно удельная поверхность образующегося при ударной термообработке терморасширенного графита может составлять от 40 до 200 м²/г.

Терморасширенный графит прессуется без связки. Прессованный терморасширенный графит может быть изготовлен в виде уплотнений или в виде графитовой фольги, при этом плотность материала может изменяться от 0,1 до 1,8 см³. Графитовая фольга имеет уникальную структуру, крайне малую газопроницаемость и благодаря отсутствию смачивания является идеальным барьером для проникновения алюминия, обладает хорошими барьерными свойствами по отношению к криолиту, а также к диффузии натрия в алюминиевых электролизерах.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КИАНИТА И МУЛЛИТА ИЗ ВИРДЖИНИИ (США) В ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

(✉)

E-mail: sashlock@kyanite.com
lebedev@cofermin.ru

© С. Эшлок¹ (✉), к. т. н. И. В. Лебедев² (✉)

¹ Компания Kyanite Mining Corp., США

² Компания Cofermin Rohstoffe, GmbH & Co. KG, Германия

Алюмосиликатные минералы группы силлиманита с высоким содержанием глинозема (60–70 %) являются ключевыми компонентами в рецептуре огнеупоров во всем мире в течение многих лет. Эти минералы проявляют свойства, которые могут быть использованы при производстве высококачественных огнеупоров с повышенной прочностью в горячем состоянии, превосходящим сопротивлением ползучести и с превращени-

ем в муллит при нагреве. Различия в свойствах трех минералов группы силлиманита (кианит, силлиманит и андалузит) объясняются уникальной кристаллической структурой каждого из минералов.

При нагреве минералы группы силлиманита претерпевают фазовое превращение с образованием муллита и избытка кремнезема. При этом катионы Al³⁺ в кристалле перегруппировываются из-за изменения

координационного числа, что вызывает необратимое расширение и превращение в муллит. Из трех минералов кианит расширяется в наибольшей степени (17 об. %) при наименьшем необходимом потреблении энергии (температура обжига 1400 °С). Это свойство может быть использовано для компенсации усадки огнеупорной смеси, а также для увеличения ее плотности при использовании мелких фракций кианита. Силлиманит занимает второе место по расширению (6 об. %), но для его полной конверсии требуется очень высокая температура обжига (1700 °С). Большинство огнеупоров не обжигают при такой высокой температуре, поэтому силлиманит в основном используется как стабильный (с точки зрения расширения) наполнитель с высоким содержанием глинозема. Андалузит обладает наименьшим из трех минералов расширением, всего на 4 об. %. Полное превращение андалузита в муллит происходит при температуре около 1600 °С. Некоторые компании используют андалузит для компенсации усадки огнеупорной смеси, но для этого необходимы большое количество андалузита в смеси и высокая температура обжига.

Обжиг кианита — формирование муллита

Кианит Virginia Kyanite™ может быть обожжен до муллита Virginia Mullite™ — единственного в мире муллита, полученного из кианита. Этот материал отличается от муллита, полученного при прокаливании глинистых минералов: в нем сохраняется форма кристаллов кианита в виде лезвия, создавая большой кристалл с высоким соотношением сторон за счет фазового превращения. Кроме того, такой муллит отличается от муллита, которые создаются путем экструзии или измельчения глины, и поэтому имеет несколько округлую форму частиц. Таким образом, муллит из кианита имеет ограничения по размеру. Размер частиц муллита не может быть больше размера исходных кристаллов кианита. Самый большой размер — 20×50 меш (840×300 мкм). Форма кристаллов муллита и небольшое количество примесей, оставшихся после очистки кианита, придают материалу отличные высо-

котемпературные свойства, в частности сопротивление ползучести.

Применение кианита Virginia Kyanite™ для производства огнеупоров

Самое распространенное на сегодняшний день применение кианита — производство огнеупорных смесей (бетонов, леточных и набивных масс, торкрет- и шоткрет-масс и др.). Прогнозируемый показатель расширения кианита в процессе обжига используется различными способами. Более крупные фракции -40 меш (420 мкм) и -50 меш (300 мкм) обычно используют для контроля усадки. Очень часто объединяют крупнозернистый кианит с мелкими фракциями -200 меш (75 мкм) и -325 меш (45 мкм). Добавление мелкого материала в состав огнеупорной смеси повышает плотность огнеупора за счет заполнения пустот, образующихся при расширении. Фазовое превращение мелкой фракции также обеспечивает присутствие муллита в матрице, который способствует повышению устойчивости материала к тепловому удару. Повышение содержания муллита в матрице, а также снижение ее пористости способствуют увеличению срока службы огнеупора.

Кианит активно применяется также для изготовления формованных огнеупорных изделий, в том числе для алюминиевых электролизеров, печной фурнитуры, в литейной отрасли, а также в качестве альтернативы микрокремнезему в огнеупорных массах и для частичного замещения кальцинированного глинозема.

Применение муллита Virginia Mullite™

Муллит Virginia Mullite™ используется в огнеупорах всех типов, которые должны обладать хорошей стойкостью к тепловому удару, жаропрочностью, а также высоким сопротивлением ползучести, в частности в огнеупорах, содержащих около 60 % оксида алюминия. Мелкие фракции муллита вводят в бетоны с низким содержанием цемента и в сухие виброукладываемые смеси. Очень низкое количество примесей в муллите обуславливает его применение, например, для футеровки стен тепловых агрегатов, для изготовления печной фурнитуры, а также в литейной отрасли.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ



E-mail: Danilova_OY@vabz.ru

СЛУЖБА КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ВОЛЖСКИЙ АБРАЗИВНЫЙ ЗАВОД»

© К. х. н. Д. В. Данилов, О. Ю. Данилова (✉), Г. И. Кулёмина, О. А. Попов, Н. В. Ушакова
ОАО «Волжский абразивный завод», г. Волжский, Россия

Такие свойства материалов на основе SiC, как высокие теплопроводность, термостойкость, стойкость к абразивному износу и коррозии при воздействии агрессивных сред, повышенная прочность в широком диапазоне температур вплоть до высоких обусловили их применение в разных отраслях. Материалы на

основе SiC обладают электропроводящими свойствами; в некоторых случаях чувствительны к кислороду и водяному пару, особенно в интервале 1000–1200 °С. Изделия из SiC используют для футеровки тепловых агрегатов черной и цветной металлургии, а также в печах для сжигания отходов при воздействии очень

высоких рабочих температур. Из карбида кремния изготавливают печную фурнитуру (высокотемпературные системы штабелирования и транспортирования) для керамической промышленности, а также износостойкую футеровку для оборудования, подвергаемого сильному абразивному износу (приготовление и транспортирование материалов).

С 1981 г. на Волжском абразивном заводе выпускаются карбидкремниевые изделия на муллитокремнеземистой связке марки КМК и алюмосиликатной связке марок КА и КАС. Изделия используются в качестве печной фурнитуры для высокотемпературного обжига продукции керамической промышленности (изоляторы, абразивный инструмент на керамической связке и т. п.). Применение изделий на муллитокорундовой связке обусловлено их высокой теплопроводностью. Температура службы изделий марки КМК до 1450 °С, марок КА и КАС до 1300 °С, термостойкость более 100 водяных теплосмен от 950 °С. Лимитирующим фактором службы таких изделий является окисление карбида кремния 950–1700 °С по реакции $2SiC + 3O_2 \rightarrow 2SiO_2 + 2CO$. В среде водяного пара выше 1300 °С возможна реакция $SiC + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + CH_4$. Реакция окисления SiC проходит с увеличением объема, что приводит к разрушению огнеупора.

С 2009 г. на заводе начался выпуск карбидкремниевых изделий на нитридной связке марок КН и ВАЗБО-НИТ КН-1, предназначенных в основном для футеровки алюминиевых электролизеров. Изделия работают в агрессивных условиях. Карбид и нитрид кремния

взаимодействуют с кислородом и углекислым газом; отрицательное воздействие оказывает также криолит. Окисление нитрида кремния является сложным процессом, что в значительной мере зависит от вида спекающих добавок и примесей в материале. Первичная пленка представляет собой диоксид кремния, который формируется непосредственно из реакции нитрида кремния и кислорода $Si_3N_4 + 3O_2 \rightarrow 3SiO_2 + 2N_2$. Разрушение карбидкремниевых блоков на уровне верхней границы электролита происходит по реакциям окисления нитрида и карбида кремния до кремнезема, который далее растворяется в электролите. Кроме того, проходят другие реакции окисления: $2SiC + NaAlF_4 + 2O_2 = SiF_4 + NaAlSiO_4 + 4C$ и $2Si_3N_4 + 3NaAlF_4 + 6CO_2 = 3SiF_4 + 3NaAlSiO_4 + 6C + 4N_2$.

Хорошо себя показали карбидкремниевые изделия на нитридной связке в котле мини-ТЭЦ. Коррозия огнеупорных изделий происходит не только в результате реакции окисления, но и в ходе дополнительной реакции $Fe_2O_3 + 3SiC \rightarrow Fe_2Si_3 + 3CO$. Источником железа являются трубы, расположенные внутри котла, в которых при нагревании воды образуется пар, требующийся для нужд завода. Срок службы карбидкремниевых изделий на нитридной связке в котле мини-ТЭЦ составил четыре отопительных сезона при требуемых двух.

В настоящее время при активном развитии металлургических процессов изделия из карбида кремния благодаря своим уникальным свойствам кремния, несомненно, найдут свое место.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ



E-mail: idatsko@magnezit.com

ОГНЕУПОРНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ПАТРУБКОВ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ РН-ВАКУУМАТОРОВ© И. А. Дацко (✉), А. О. Мигашкин, Ю. В. Данилова
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Современные металлургические агрегаты с каждым годом повышают требования к огнеупорным материалам. Внепечная обработка является неотъемлемой частью получения высококачественной стали. Среди наиболее сложных с точки зрения службы огнеупоров агрегатов можно выделить циркуляционный вакууматор (РН-вакууматор). В Группе «Магнезит» в 2019 г. был разработан ряд огнеупорных саморастекающихся бетонов для футеровки внешней части всасывающего и сливного патрубков циркуляционного вакууматора. Особенность разработанного ряда заключается прежде всего в самоуплотнении и самовыравнивании полученных составов при минимальном количестве воды затворения — технология «self flow». Это качество является обязательным требованием к бетону, применяемому для футеровки патрубков на металлургических предприятиях, эксплуатирующих РН-вакууматоры.

С учетом опыта и требований металлургов были разработаны три состава бетона, содержащих шпинель, оксид хрома или их комбинацию. Основные физико-химические и механические показатели разработанных составов не уступают показателям

продуктов, имеющихся на рынке. В то же время полученные составы существенно отличаются своими служебными характеристиками. Так, бетон, содержащий оксид хрома, показал наивысшую стойкость к шлаку, минерально-фазовый состав которого был представлен в основном двухкальциевым силикатом (48–53 %) двух модификаций (γ - Ca_2SiO_4 — шеннонита и β - Ca_2SiO_4 — ларнита), фторсодержащим алюминием кальция (25–29 %), флюоритом CaF_2 (10–12 %). Лабораторные тесты на шлакоустойчивость, проведенные тигельным методом, показали площадь пропитки почти в 2 раза ниже, чем у классических шпинелесодержащих вариантов, имеющихся сегодня на рынке. В результате химического взаимодействия шлака с огнеупором пропитка осуществлялась кальциевым алюмосиликатом — геленитом и диалюминатом кальция. Кроме того, в результате взаимодействия кальциевой составляющей (из шлака) с корундом в огнеупорах наблюдается значительное образование вторичного бонита как в виде каемок вокруг зерен корунда, так и в виде отдельных частиц в тонкомолотой составляющей.

Разработанный состав с добавкой оксида хрома и шпинели показал наибольшую стойкость к термостатированию. В то же время классический вариант — высокоглиноземистый бетон с добавкой шпинели является золотой серединой и совмещает высокую стойкость к шлаку и стойкость к термическим ударам.

Лабораторные испытания, проведенные сотрудниками Группы «Магнезит», а также опыт специалистов управления инжиниринга позволяют с уверенностью сказать, что разработанные составы могут быть успешно использованы для футеровки наружной части патрубков циркуляционного вакууматора.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ



E-mail: d.denisov@aliter.spb.ru

БЕТОНЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЛОТНОСТЬЮ И БЕТОНЫ НА КРЕМНЕЗОЛЬНЫХ СВЯЗУЮЩИХ — ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

© К. т. н. **Д. Е. Денисов** (✉), **О. К. Некрасова**
ООО «Алитер-Акси», Санкт-Петербург, Россия

Технические характеристики гидравлически твердеющих бетонов зависят от количества воды, добавляемой в сухую огнеупорную смесь при приготовлении бетона. Как правило, превышение этого количества на несколько процентов облегчает укладку, но приводит к снижению прочности и плотности бетона. Дальнейшее избыточное увлажнение не имеет смысла — вода «не усваивается» бетоном; происходят его расфракционирование и расслоение.

На предприятии «Алитер-Акси» разработаны огнеупорные смеси с регулируемой плотностью, которые производятся под торговой маркой АЛИФЛЕКС. При изготовлении огнеупорных изделий и футеровки из этих смесей количество добавляемой воды можно варьировать в чрезвычайно высоких пределах, радикально изменяя плотность, теплопроводность и прочность получаемого бетона. Увеличением содержания воды вдвое можно также снизить плотность бетона в 2 раза, существенно улучшив его теплоизоляционные характеристики. Структура бетона при этом становится более пористой и менее прочной, но сохраняет однородность. Химический и фазовый составы, разумеется, не изменяются, огнеупорность остается практически на том же уровне. Из огнеупорных смесей с регулируемой плотностью можно получать огнеупорные бетоны с уникальными свойствами. К таким бетонам относятся, например, бетоны на основе сферокорунда с температурой службы 1800 °С и плотностью менее 1 г/см³; теплоизоляционные бетоны плотностью около 0,3 г/см³, теплопроводность которых сравнима с теплопроводностью волокнистых материалов; облегченные низкоцементные бетоны, футеровку из которых можно сушить по ускоренному режиму.

Предприятие «Алитер-Акси» производит огнеупорные бетоны на кремнезольных связующих под торговой маркой АЛИКАСТ нано. В этих бетонах алюминат-кальциевый цемент полностью заменен на кремнезоль на основе наночастиц SiO₂ размерами около 10 нм. Основные особенности этих бетонов:

– сушку можно проводить по ускоренному режиму (50–100 °С/ч). Как и в ультранизкоцементных бетонах,

практически полное удаление воды происходит ниже 150 °С, но вода при этом удаляется с большей скоростью, так как бетоны на кремнезоле обладают гораздо более высокой газопроницаемостью при низких температурах. При гидратации цемента образуются гидраты с низкой плотностью, поры закрываются, газопроницаемость снижается, в то время как при образовании геля поры остаются открытыми и проницаемыми;

– сушку футеровки или изделий можно начинать сразу же после затвердевания бетона, выдержка, необходимая для гидратации цемента, не нужна;

– практически не содержат CaO, благодаря исключительно малому размеру наночастиц SiO₂ облегчается спекание и мулитообразование, поэтому высокотемпературные характеристики отличные;

– термостойкость (на любых заполнителях) существенно превышает термостойкость аналогичных бетонов, содержащих цемент;

– обладают высокой адгезией к кирпичной кладке или к монолитной футеровке, что делает их незаменимыми при проведении ремонтных работ, в том числе при высокой температуре ремонтируемой поверхности;

– медленно твердеют после укладки, прочность сырца до проведения сушки невелика, что может привести к проблемам при снятии опалубки и транспортировке изделий, не подвергнутых термообработке.

Гелеобразование происходит вследствие удаления воды, поэтому наиболее целесообразно применять бетоны на кремнезольных связующих для изготовления изделий и футеровки с высокой открытой поверхностью для быстрой естественной сушки. В других случаях следует применять бетоны с добавками, ускоряющими гелеобразование. Эффективность применения этих бетонов наиболее высока при эксплуатации в условиях частых температурных перепадов и умеренных механических воздействий (крышки промежуточных ковшей, печи с выкатным подом, периодические печи сжигания и т. д.). Отличные результаты получены при исправлении мелких дефектов футеровки и проведении ремонтных работ, в том числе при высокой температуре ремонтируемой поверхности.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

МАГНЕЗИАЛЬНЫЙ ТИКСОТРОПНЫЙ БЕТОН МАРКИ MAGCAST P88 И ИЗДЕЛИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ MAGSTONE P88✉
E-mail: dmarchenko@magnezit.com© М. А. Ерошин, Д. А. Марченко ✉, М. Р. Фахрутдинова
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

В результате проведения исследовательской работы разработаны магниезильный тиксотропный бетон марки MAGCAST P88 и изделия на его основе MAGSTONE P88. В качестве исходного материала использовали плавный периклазовый порошок с содержанием MgO не менее 96,0 %. Бетон имеет следующий химический состав, мас. %: MgO 93,0, Al₂O₃ 0,40, CaO 1,7. Свойства бетона после обжига при 1690 °С: предел прочности при сжатии 53,0 МПа, кажущаяся плотность 2,95 г/см³, открытая пористость 16,8 %, дополнительная ли-

нейная усадка 0,1 %, температура начала деформации (ISO) 1600 °С. Индекс растекаемости бетонной смеси по ГОСТ P52541–2006 составляет 150 % при добавлении воды в количестве 5,0–6,0 %.

Изделия MAGSTONE P88 (металлоприемники) в количестве 10 т (44 шт.) отработали на предприятии «ТОРЭКС-Хабаровск», масса MAGCAST P88 была отгружена на Белорусский металлургический завод в количестве 10 т. Нареканий от потребителей не поступало.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННО-ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ИЗДЕЛИЙ СИСТЕМЫ Al₂O₃–SiO₂ С НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ✉
E-mail: zroman7777@mail.ru© К. т. н. Р. В. Зубашенко ✉
ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол, Россия

Низкая термостойкость огнеупорных изделий служит частой причиной их быстрого износа (периодический режим работы, аварийные остановки, остановки на ремонт). Поэтому повышение термостойкости огнеупорных материалов является одной из основных задач технологии огнеупоров.

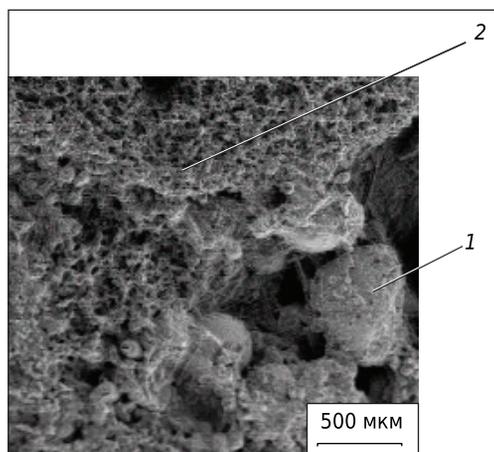
Известно, что разрушение огнеупорных изделий от термических напряжений является двустадийным процессом: первая стадия — зарождение трещин, вторая — распространение и развитие трещин. Присутствие в огнеупоре муллитокремнеземистого волокна препятствует распространению зародышевых трещин. Кроме того, при его высоком содержании формируется контактная микроструктура, препятствующая передаче тепла кондукцией.

Футеровка, выполненная традиционными изделиями (модули) на основе муллитокремнеземистого стекловолокна (ГОСТ 23619–79), обладает значительно более высокой термостойкостью, чем футеровка из ячеистых керамических материалов (JM-28, JM-30, КТ-1,1, КТ-1,3 и др.). Однако кристаллизация, протекающая в стеклообразных волокнах при нагревании, ограничивает максимальную температуру применения изделий на их основе до 1150 °С (содержащих Cr₂O₃ до 1300 °С, ZrO₂ до 1425 °С). Образующиеся при нагреве микрокристаллические образования вызывают резкое снижение прочности волокон; они становятся хрупкими и дают усадку. В процессе эксплуатации при повышенных температурах это приводит к разрушению теплоизоляционного слоя.

Муллитокремнеземистые волокна могут образовывать высокопористые композиции, полученные методом вибропрессования, в которых волокна упрочнены неорганической связкой, незначительно снижающей пористость и тепловое сопротивление волокнистого материала. Эта тех-

нология в промышленных масштабах реализована в ЗАО «ПКФ «НК». Микроструктура конструкционно-теплоизоляционных алюмосиликатных изделий показана на рисунке.

Освоенные конструкционно-теплоизоляционные изделия имеют достаточно низкую теплопроводность, а также, как и традиционные, гораздо большее сопротивление тепловому удару, чем, например, ячеистая корундовая керамика (КТ-1,3). Изделия представляют собой обожженный пористый материал, сформированный из хаотично расположенных волокон системы Al₂O₃–SiO₂ (до 40 %), зерен пористого корундового заполнителя 1 и неорганической связки (огнеупорной глины), упрочняющей волокна 2 (см. рисунок). Обожженный полуфабрикат подвергается механической обработке. Применяемый заполнитель стабилизирует усадочные процессы этого материала. Основными кристаллическими соединениями изделий являются корунд, муллит и α-кristобалит. Такой фазовый состав формируется как в результате



физико-химических процессов, происходящих при обжиге сырья, так и при кристаллизации стекловолна.

Такая технология обеспечивает освоению алюмосиликатному легковесному огнеупору (пат. 2643375 РФ) помимо высокой термостойкости и низкой теплопроводности (до 0,35 Вт/(м·К) при средней температуре 650 °С) относительно высокую механическую прочность (до 7 МПа при кажущейся плотности < 1,35 г/см³), а также высокую температуру эксплуа-

тации (до 1500 °С). Разработанные изделия являются хорошей альтернативой корундовым теплоизоляционным изделиям марок КТ-1,1 и КТ-1,3 (ГОСТ 5040–2015). В течение 15 лет они применялись в разных тепловых агрегатах, в том числе на предприятиях «Теплохиммонтаж», «ПКФ «НК», «ОСМиБТ», «ТХМ-Промпечь», а также на Оскольском электрометаллургическом комбинате, Новолипецком металлургическом комбинате, Речицком фарфоровом заводе.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИЙ АЛЮМОСИЛИКАТНЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ

(✉)

E-mail: zroman7777@mail.ru

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

Основная тенденция развития огнеупорной отрасли в последнее время — увеличение производства неформованных огнеупоров. Значительную долю этих материалов составляют теплоизоляционные бетоны. В качестве пористых заполнителей при их производстве используют вспученный вермикулит, вспученный перлит, керамзит, бой шамотных и диатомовых теплоизоляционных изделий и др. Ввиду ограниченности боя шамотных легковесных изделий в ЗАО «ПКФ «НК» разработана технология производства огнеупорного пористого заполнителя, полученного на основе пенометода.

При разработке технологии определяли оптимальный состав пеномассы, изучали кинетику сушки и изотермического спекания материала, а также его свойства (предел прочности при сжатии, кажущуюся плотность, насыпную плотность, фракционный состав). Отработку технологии проводили на действующем производстве с использованием промышленного смесителя, туннельного сушила, малогабаритной туннельной печи, дробилки и грохота. В результате был освоен выпуск шамотного пористого заполнителя NK-Chamotte LW с содержанием Al₂O₃ не менее 28 %

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

ОГНЕУПОРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ — ЛЕГКИХ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ

(✉)

E-mail: bakor@ntcbakor.ru
diolem@muctr.ru

© Д. т. н. **Б. Л. Красный**¹ (✉), к. т. н. **К. И. Иконников**¹, к. т. н. **Д. О. Лемешев**² (✉),
А. Л. Галганова¹, **А. С. Сизова**¹

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

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

В процессе сгорания угольного топлива на тепловых электростанциях в год образуется около 25 млн т золошлаковых отходов. В зависимости от типа котлов, вида топлива и режима его сжигания в золошлаковой смеси содержатся шлак, частицы несгоревшего топлива и 70–85 % золы-уноса. Уровень вовлечения этого продукта составляет всего 10 % массы годового выхода, в связи с чем продукты сгорания бурого угля продолжают накапливаться на золоотвалах и к 2030 г. масса накопившихся отходов превысит 2 млрд т. Морфология и размер частиц золы-уноса определяются температурой горения, скоростью охлаждения и ее составом. Зола-унос состоит в основном из твердых сфер (2300–2600 кг/м³), ценосфер (<1400 кг/м³), частиц неправильной формы и несгоревшего углерода. Размер частиц золы-уноса варьируется в диапазоне от 1 до более 200 мкм; полые ценосферы и частицы углерода крупнее. Зола-унос состоит из оксидов кремния, алюминия и железа. Минеральный состав и дисперсность золы-уноса определяют возможности ее использования в разных отраслях.

Весьма перспективно использование золы-уноса в качестве сырья в производстве огнеупорной керамики и теплоизоляции. Этот продукт может заменять глину или шамот, а также высококачественные материалы, являющиеся источником оксидов алюминия и кремния, при синтезе фаз муллита, кордьерита, шпинели т. д. Мелкодисперсность порошка позволяет включать его в технологический процесс практически без предварительной обработки. Однако применение золы-уноса как недорогого доступного сырьевого материала позволяет не только минимизировать затраты на производство, но и получить материалы с хорошими теплофизическими свойствами. Основные виды керамических изделий, которые могут быть получены с использованием золы-уноса: глазурованная плитка, стеклокерамика, керамические волокна, огнеупоры, в том числе теплоизоляционные материалы.

В НТЦ «Бакор» получен ряд огнеупорных теплоизоляционных керамических материалов с использованием полых алюмосиликатных микросфер

золы-уноса в качестве легковесного заполнителя, перспективных для создания материалов плотностью от 0,5 г/см³. В качестве исходных компонентов использовали полую алюмосиликатную микросферу, глину огнеупорностью не ниже 1630 °С, высокоглиноземистый заполнитель, органический пластификатор и кремнийсодержащее связующее. Для получения изделий было выбрано вибропрессование, преимущество которого состоит в том, что при достаточно низком усилии за счет вибрационного воздействия на формовочную массу удается получить равноплотную прессовку; при этом напряжения в теле сырца минимизируются. Для получения крупногабаритного блока был опробован способ виброформования с пригрузом, а для получения фасонных изделий метод вибролитья с применением алюмосиликатной сферы. Относительно низкая влажность формовочных масс позволила сократить длительность сушки почти в 5 раз по сравнению с химическим и пеновым методами формирования пористой структуры и исключить значительные усадочные деформации, приводящие к браку. Использование органического пластификатора обеспечило технологичность формовочных масс, а полипропиленовая фибра способствовала повышению прочности сырца и улучшенному влаготводу. Пони-

Показатели	Изделие марки		
	0,5	0,8	0,9
Содержание, мас. %:			
Al ₂ O ₃	32	50	60
SiO ₂	65	45	35
Fe ₂ O ₂	2	1,5	1
Плотность, г/см ³			
Предел прочности при сжатии, МПа	0,5–0,6	0,7–0,8	0,8–0,9
Дополнительная усадка, %, не более (при температуре)	1,5	2,5	3,5
Теплопроводность, Вт/(м·К), при средней температуре, °С:			
300	0,23	0,29	0,37
500	0,26	0,32	0,39
700	0,28	0,35	0,40
900	0,33	0,39	0,45
1100	0,48	0,51	0,66

женная влажность формовочной массы и использование полипропиленовой фибры позволили довести выход годного продукта до 99 %. Полученные изделия имеют равномерную структуру, заданные размеры, четко оформленные грани и ребра. Характеристика изделий марок 0,5, 0,8 и 0,9 приведена в таблице.

Изделия применяют в футеровке тепловых агрегатов разных отраслей промышленности.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)

E-mail: tdyatchek@zircoa.com

ЦИРКОНИЕВЫЕ ОГНЕУПОРЫ КОМПАНИЙ ZIRCOA, Inc. И DYSON TECHNICAL CERAMICS для МНЛЗ, ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ДЛЯ ДРУГИХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

© Т. Лейтзел¹, Дж. Махоски¹, К. Штойер¹, Р. Тейлор², Т. А. Дьячек³ (✉), к. ф.-м. н. А. В. Шуклинов³

¹ Компания Zircoa Inc., г. Солон, Огайо, США

² Компания Dyson Technical Ceramics, г. Шеффилд, Великобритания

³ ООО «Циркоа-РУС», г. Тамбов, Россия

В 2017 г. произошло объединение компаний Zircoa, Inc. и Dyson Technical Ceramics (DTC). Обе компании сохранили свою идентичность, однако последовавший затем обмен опытом позволил обеим компаниям существенно расширить исследовательскую и производственную базу и укрепить положение на рынке высококачественных циркониевых огнеупоров. Исключительно высокая огнеупорность, эрозионная стойкость и механическая прочность керамики на основе стабилизированного ZrO₂ позволяют использовать ее в условиях высоких температур в сочетании с воздействием агрессивных сред и механического износа. Незначительная смачиваемость керамики расплавами большинства металлов и сплавов дает ей дополнительное преимущество при службе в контакте с металлами платиновой группы, сталью, жаропрочными сплавами и т. д. С другой стороны, высокая стоимость циркониевой керамики вынуждает искать способы уменьшения ее объема без потери эксплуатационных свойств. Именно поэтому ZrO₂ нередко применяется в виде вставок в изделия из более дешевых огнеупорных материалов, в частности, в некоторые огнеупоры для непрерывной разливки стали.

Комплекс свойств ZrO₂ позволяет замедлить как разрушение, так и зарастание внутреннего канала стакана-дозатора и гнездового блока, что положительно влияет на скорость разливки стали и стабильность ее струи. Сменный стакан-дозатор с циркониевой вставкой может обеспечивать от 6 до 24 ч непрерывной разливки в зависимости от состава керамики и сорта стали. Компания DTC производит стаканы-дозаторы для непрерывной разливки стали открытой струей для всех основных систем быстрой замены (включая CNC, MNC и др.) и гнездовые блоки, снабженные циркониевой вставкой высокого качества. Кроме того, компания имеет стабильно высокий объем ежегодных продаж изделий для МНЛЗ по всему миру, включая регулярные поставки в Россию. Компания Zircoa, Inc., в свою очередь, специализируется на выпуске отдельных циркониевых вставок в стаканы-дозаторы и плиты для шибберных затворов. Ежегодно с завода в Солоне отгружается несколько сотен тысяч единиц продукции этого типа для потребителей из разных стран.

Стойкость к термическому удару, несмачиваемость и высокая огнеупорность ZrO₂ — свойства, которые требуются для изготовления распылительных

форсунок для производства металлических порошков. Большой опыт и непрерывные инвестиции в НИОКР уже много лет обеспечивают компаниям DTC и Zircoa, Inc. первое место среди лидеров в поставках этого вида изделий. Постоянно оптимизируются существующие и создаются новые керамические композиции; разработка дизайна ведется в сотрудничестве как с производителями порошков, так и с поставщиками оборудования для их изготовления. Следует отметить, что на сегодняшний день существенный объем российских металлических порошков вырабатывается с использованием распылительных форсунок компаний DTC и Zircoa, Inc.

Помимо вышеуказанной продукции компании производят циркониевые и корундомуллитциркониевые тигли, циркониевые изделия для футеровки тепловых агрегатов, трубы и диски, подложки и пластины для службы при 2000 °С и выше, огнеупорные засыпки из спеченного и плавленного ZrO_2 , а также циркониевый бисер для мельниц и порошок с содержанием ($ZrO_2 + HfO_2$) выше 99,6 %. Продукция применяется также для прецизионного литья, аффинажа благородных металлов, в производстве синтетических кристаллов, высокочистого кварцевого стекла, технического углерода и др.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АНТИОКСИДАНТОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ПО СВЧ-МЕТОДУ В УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОГНЕУПОРАХ

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)
E-mail: mir@ntpf-etalon.ru

© К. т. н. **И. Р. Манашев** (✉), **Э. М. Манашева**
ООО Научно-техническая производственная фирма «Эталон», г. Магнитогорск, Россия

В себестоимости производства стали заметную долю составляют затраты на огнеупоры, а также на ремонт и монтаж футеровки металлургических агрегатов. Один из перспективных путей снижения удельного расхода и затрат на огнеупоры — применение в огнеупорном производстве современных композиционных материалов для совершенствования традиционных огнеупоров и создания новых, обладающих высоким уровнем физико-технических показателей.

Широкое применение в металлургическом производстве получили огнеупоры оксидно-углеродистого состава (периклазоуглеродистые, корундографитовые и др.). Их используют для изготовления рабочего слоя футеровки, а также в качестве функциональных изделий для разливки стали. Состав оксидно-углеродистых огнеупоров включает наполнитель, графит и связующие материалы; иногда в состав вводят специальные добавки-антиоксиданты для замедления процесса обезуглероживания и разрушения огнеупора. Традиционно в качестве таких добавок применяют порошки первичного и вторичного алюми-

ния, технический кремний и карбид кремния, бескислородные материалы на основе боридов, нитридов, карбидов и других соединений. Наиболее эффективными антиоксидантами считаются борсодержащие сплавы (AlB_2 , MgB_{12} , B_4C , TiB_2 и др.), однако из-за высокой стоимости их используют ограниченно. Среди нитридов наиболее привлекательными для применения в качестве антиоксидантов являются композиционные материалы на основе нитридов кремния и бора (см. таблицу). Нитрид кремния отличается высокой термической и коррозионной стойкостью, низким ТКЛР, а также инертностью к воздействию расплавов чугуна, шлака и ряда цветных металлов. В огнеупорной промышленности его применяют в качестве связки карбидкремниевых изделий. Карбидкремниевые изделия на нитридной связке используют для футеровки алюминиевых электролизеров, коксовых батарей, доменных печей, топочных устройств. Введение нитрида кремния в состав леточных и желобных набивных масс в композиции с ферросилицидной связкой (NITRO-FESIL, REFRASIN) обеспечило повышение стойкости этих масс к воздействию расплавов чугуна и шлака доменного производства. При использовании нитридкремниевых соединений в составе углеродсодержащих изделий реализуется защитный механизм, в результате которого при последовательном термическом разложении нитрида кремния и протекании реакций карбидообразования-окисления в поверхностном слое огнеупора формируется защитный слой, поры которого заполнены азотом. Такой барьерный слой препятствует проникновению кислорода во внутренние слои огнеупора и замедляет окисление углерода.

В НТПФ «Эталон» разработан ряд композиционных материалов на основе нитридов кремния и бора для производства некоторых видов огнеупоров (см. таблицу). С использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) получены компо-

Материал	Композиция	Огнеупорные изделия
Нитрид кремния на ферросилицидной связке: NITRO-FESIL REFRASIN	$Si_3N_4-Fe(Si)$ $Si_3N_4-SiC-Fe(Si)$	Массы леточные, набивные желобные
Нитрид кремния: НК-1 НК-2 (в композиции с остаточным кремнием)	Si_3N_4 Si_3N_4-Si	Периклазоуглеродистые, корундографитовые
Композиционный материал Нитрокарбид (НКК-1)	Si_3N_4-SiC	Карбидкремнийсодержащие различного назначения
Композиционный материал на основе нитрида бора (НБ-1)	$BN-Al-Al_2O_3$	Периклазоуглеродистые, корундографитовые

зиции специализированного назначения и освоено их производство в СВС-реакторах объемом 0,15 м³. Синтез материалов осуществляется при высокой температуре (~2000 °С) и давлении около 10 МПа.

Для углеродсодержащих огнеупоров предлагаются композиционные материалы марок НК-2 и НБ-1, которые проявляют защитные антиокислительные свойства в широком интервале температур, обеспечивая стойкость огнеупоров как к окислению, так и к шлаковому раз-

еданию. Лабораторные испытания, проведенные специалистами комбината «Магнезит», показали, что при использовании композиционных материалов в образцах периклазоуглеродистых изделий наблюдается улучшение их физико-механических свойств после коксующегося обжига. На основании этих исследований планируются опытно-промышленные испытания изделий с композиционными антиоксидантами в футеровке сталеплавильных агрегатов и сталеразливочных ковшей.

ОГНЕУПОРЫ ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ» ДЛЯ АГРЕГАТОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

(✉)
E-mail: amigashkin@magnezit.com

© А. О. Мигашкин (✉), к. т. н. Т. В. Ярушина, к. т. н. М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин
ООО «Группа Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Специалистами Группы «Магнезит» изучены факторы износа огнеупоров в футеровке патрубков RH-вакууматоров. Износ футеровки всасывающего патрубка был исследован с помощью термомеханического моделирования методом конечных элементов. Был проведен расчет термических напряжений при разных вариантах закрепления системы. Снижение склонности изделий к образованию сколов может быть достигнуто увеличением их термочувствительности до уровня, исключающего возможность зарождения трещин, а также созданием микроструктуры, препятствующей распространению трещин. Снижение капиллярной пропитки изделий шлаковыми расплавами не только позволит снизить склонность их к образованию зон с разным химико-минеральным составом и физическими свойствами (в первую очередь ТКЛР), но и сохранит природу, взаимное соотношение и распределение фаз, полученных при изготовлении изделий. Кроме того, для изучения и описания механизма износа периклазохромитовых изделий исследовали микроструктуру огнеупорных изделий после службы во всасывающих патрубках RH-вакууматоров двух металлургических предприятий, на которых технология внепечной обработки стали включает введение в ковшевой шлак разных добавок. Установлено, что глубина инфильтрации компонентов шлакового расплава зависит от качества используемого огнеупора, вида гомогенизирующей добавки к шлаку в сталеразливочном ковше, используемых раскислителей и шлакообразующих материалов. Шлак, содержащий комбинацию плавикового шпата с глиноземистым шлакообразующим компонентом, проникает в микроструктуру огнеупора на большую глубину, чем при добавке только плавикового шпата, что приводит к изменению первоначального фазового состава изделия с образованием большого количества вторичных фаз. Описан процесс износа периклазохромитовых огнеупоров в футеровке всасывающего патрубка RH-вакууматора.

На основе полученных знаний разработан ряд хромсодержащих огнеупоров для футеровки вакууматоров. Высокоплотные хромитопериклазовые изделия марки ХПП-1 в настоящее время успешно используются на ряде металлургических предприятий России. Средний

химический состав огнеупоров до службы, %: MgO 59,8, Al₂O₃ 4,98, SiO₂ 0,86, CaO 0,76, Fe₂O₃ 10,9, Cr₂O₃ 21,7. Предел прочности при сжатии при комнатной температуре около 140 Н/мм², открытая пористость менее 8,0 %, кажущаяся плотность более 3,40 г/см³, предел прочности при изгибе при 1200 °С 23,0 Н/мм², температура деформации под нагрузкой по ISO 1893–89 выше 1700 °С. Огнеупоры для патрубков вакууматора обязательно пропитывают растворами солей магния или алюминия, что позволяет существенно улучшить их прочностные свойства и минимизировать тем самым растрескивание патрубков на стадии разогрева. Кроме того, снижение доли пористых пор препятствует проникновению шлака вглубь огнеупора и взаимодействию шлаковых фаз с его матрицей с образованием жидких алюминатов кальция или твердых типа шпинели и двухкальциевого силиката. При этом повышается плотность пропитанных участков.

Стойкость футеровки вакууматоров во многом зависит от качества ее выполнения. К ширине вертикальных и горизонтальных швов в рабочем слое футеровки патрубков вакууматора предъявляются особо жесткие требования. В Группе «Магнезит» оборудован участок по шлифованию изделий. Процесс шлифования изделий осуществляется на двух станках фирмы Wassmer. Введена в эксплуатацию шлифовальная станция этого же производителя, позволяющая за один цикл проводить шлифование четырех сторон изделия. Перед отгрузкой потребителю изделия для патрубков проходят обязательную стендовую сборку в кольца. Группа «Магнезит» имеет возможность поставлять как изделия для колец патрубков, прошедшие стендирование, так и готовые кольца, изделия в которых склеены между собой. Для обеспечения кривизны торцевой поверхности колец патрубков до 0,25 мм их шлифование осуществляется на специальном шлифовальном станке в собранном виде.

В настоящее время Группа «Магнезит» имеет возможность производить высокоплотные прямосвязанные хромитопериклазовые изделия для циркуляционных вакууматоров, качество которых и предельные отклонения по размерам позволяют гарантировать стойкость футеровки не ниже стойкости футеровки из импортных изделий.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

ТОНКОСТЕННАЯ КЕРАМИКА АО БКО

(✉)

E-mail: scareva@aoabko.ru

© К. Т. Н. **А. В. Сакулин**, К. Т. Н. **С. И. Гершкович**, К. Т. Н. **Ф. Р. Иксанов**, К. Э. Н. **Д. А. Михайлов**, **А. В. Витовский**, К. Т. Н. **В. А. Мусевич** (✉), **А. А. Никитин**

АО «Боровичский комбинат огнеупоров», г. Боровичи Новгородской обл., Россия

Повышение эффективности разливки стали сифонным способом на металлургических и литейных предприятиях, производящих сортовые, кузнечные и специальные слитки, зависит от качества применяемых в тепловых агрегатах огнеупорных материалов. Однородный химический состав, плотная макроструктура конечной продукции, низкая степень загрязнения неметаллическими включениями, вредными примесями, а также необходимые физические свойства — наивысшие показатели качества огнеупора.

В 2014–2015 гг. Боровичский комбинат огнеупоров (БКО) успешно освоил выпуск нового вида продукции – шамотных изделий марки HShS для литниковых питающих систем для предприятий, производящих литые детали и конструкции широкого спектра применения. Освоено серийное производство высокоглиноземистых огнеупоров марки МЛС-67 для разливки стали, выпускаемой разными сериями, в том числе дорогостоящих высококачественных сталей. Потребители этих огнеупоров — машиностроительные компании, механические заводы и металлургические предприятия, имеющие малотоннажное сталеплавильное производство в рамках собственных литейных цехов. Особенность производства на этих предприятиях заключается в том, что каждая плавка уникальна по своему составу и брак на слитках и отливках недопустим, поэтому литейщики, машиностроители и металлурги очень тщательно подходят к выбору поставщика огнеупорных изделий для этого передела.

Высокотехнологичные изделия производства БКО для данного сегмента рынка обладают следующими преимуществами, направленными на увеличения качества отливаемых слитков и заготовок:

- высокой точностью изготовления;
- обеспечением плотности укладки и стыковки изделий при наборе литниковой и сифонной систем, в том числе из-за отсутствия мертвеля в узлах сопряжения конструкций;
- повышением ресурса эксплуатации и стойкости в сравнении с шамотной продукцией, в том числе за счет использования бандажированных изделий;
- отсутствием трещин на изделиях в процессе заливки;
- отсутствием существенных дефектов на деталях отливок;
- минимизацией загрязнения разливаемой стали неметаллическими включениями.

Особенность производства изделий марок HShS — огромный ассортимент типоразмеров, который позволяет создать литниково-питающие системы в соответствие с требованиями и задачами потребителя. В связи с этим для комплектации заказов выпуск продукции осуществляется одновременно в двух производственных цехах комбината. В настоящее время разработанные изделия составляют конкуренцию иностранным и отечественным поставщикам аналогичной продукции. При этом непрерывно внедряются новые конструкции и дизайн изделий, расширяется номенклатура и усложняется ассортимент выпускаемой продукции в рамках политики импортозамещения. Осваивается прессование особосложных изделий: звездочек, колен, тройников, четверников, питателей. В перспективных планах комбината — внедрить в производство специализированное формовочное оборудование для повышения эффективности и производительности выпуска продукции. Расширяя спектр своей деятельности, комбинат разрабатывает и осваивает производство новых видов продукции, по своим техническим и ресурсным характеристикам превосходящей отечественные аналоги.

ПРОИЗВОДСТВО ОГНЕУПОРОВ

МАССА ГРУППЫ «МАГНЕЗИТ» ДЛЯ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ

(✉)

E-mail: epospelova@magnezit.com

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

Наиболее распространенным и широко применяемым способом выполнения рабочего слоя футеровки промежуточных ковшей является мокрое торкретирование. Однако существует альтернативный способ — просыпание сухой массой по шаблону пространства между арматурным слоем футеровки и шаблоном. Преимуществами данного способа являются:

- фиксированная толщина рабочего слоя футеровки и отсутствие возможности ее изменять;
- отсутствие угрозы нарушения целостности футеровки при сушке и разогреве, связанного с остатками воды и гидратационными явлениями внутри футеровки;
- отсутствие угрозы снижения качества разливаемых заготовок из-за отсутствия риска попадания водорода в заготовки;
- увеличение ресурса работы арматурного слоя футеровки.

В Группе «Magneзит» освоена технология производства массы марки Dalmould P 70-3 по ТТ 72664728-732-Т-2015 для изготовления рабочего слоя футеровки промежуточных ковшей по шаблону. Масса периклазофорстеритового состава работает на одном из металлургических предприятий в промежуточных ковшах. Между шаблоном и арматурным слоем футеровки промежуточного ковша масса засыпается в сухом виде, с помощью штыкования удаляется воздух. Шаблон разогревается с помощью газовых горелок до 380 °С с 2-ч выдержкой при этой температуре и затем удаляется, после чего ковш готов к работе. Известно, что наиболее изнашиваемым местом в промежуточных ковшах является шлаковая зона, поэтому при мокром способе торкретирования для увеличения серийности разливки эта зона выполняется с бо-

лее толстым слоем, чем стены и дно. При использовании шаблона нет возможности увеличить толщину футеровки шлаковой зоны, поэтому один из способов увеличения ее стойкости — применение более стойкой массы.

Специалистами Группы «Магнезит» проведены работы по исследованию тигельным методом образцов разных составов массы на устойчивость к пропитке различных шлаков. Оптимальные составы масс, в том числе с использованием плотноспеченного периклазо-

вого клинкера собственного производства, испытаны в условиях металлургического предприятия. Износ массы в шлаковой зоне в среднем за плавку составил 2,5 мм.

Известно, что шаблон может разогреваться при помощи интегрированного в него устройства; при этом сушка производится при 300–350 °С в течение 20–30 мин. Промежуточный ковш может подаваться под разливку в холодном состоянии, однако в этом случае выпускные устройства отдельно подлежат разогреву.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРЯЧИХ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРАХ

(✉)
E-mail: davidovtrans@mail.ru

© Д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉),
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия

Транспортирование горячих или полуохлажденных материалов позволяет отделить узлы охлаждения от агрегата, оснастить их оборудованием для утилизации теплоты или сохранить энтальпию продукта до следующего передела. Для исключения из технологических схем передела охлаждения горячих сыпучих материалов, а также для экономии энергии на их нагрев предусмотрена тепловая защита контейнеров. Понятно, что чем больший тепловой потенциал у горячего материала требуется сохранять, тем больший эффект может быть достигнут. С этой точки зрения наилучшие перспективы для контейнерного трубопроводного транспорта имеет пирометаллургия. Например, для плавильных процессов желательнее сохранить максимально возможный тепловой потенциал, аккумулируемый материалом на стадии подготовки (обжиг, агломерация). При производстве анодной массы целесообразно иметь кокс с температурой выше 350 °С. Процессы в растворах обычно ограничивают уровень температур подаваемого материала в пределах 150–200 °С.

При использовании для теплоизоляции контейнеров волокнистых плит из каолиновой ваты при многократной загрузке и разгрузке контейнеров наблюдаются разрушения теплоизоляции и попадание ее фрагментов в продукты последующего передела. Срок службы теплоизоляции невелик, что обуславливает необходимость иметь в обороте значительное число контейнеров. Для предохранения от механического разрушения теплоизоляционную плиту укрывают листом (отбойным щитом) из жаропрочной стали. Исследования показали, что для работы при 287 °С контейнер можно изготавливать из обычной углеродистой стали.

Разгрузка контейнеров происходит при безостановочном движении путем поворота контейнеров из транспортного положения в состояние разгрузки и возвращения в транспортное положение относительно их оси. В известном способе разгрузки контейнеров вокруг осевой линии с непрерывным их движением осуществляется путем копирования винтообразного копира опорным колесом контейнера. Винтообразная направляющая может быть выполнена в стенке трубопровода или на самом контейнере. Проблема заключается в том, что механическое взаимодействие упорного устройства контейнеров для их разворота вокруг оси с винтообразным копиром на транспортном трубопроводе усложняет конструктивное исполнение самих контейнеров, не дает возможности уменьшить длину участка разгрузки и возврата контейнеров в исходное транспортное положение, снижает надежность работы всего трубопроводного транспорта. Трение при взаимодействии упорного устройства контейнеров с винтообразным копиром на транспортном трубопроводе требует значительных энергозатрат.

В предлагаемой установке винтообразные копиры снабжены аэродинамическими гребнями, которые смонтированы на контейнерах. При этом для переворота контейнеров до разгрузочного состояния на участке разгрузки установлено сопло подачи сжатого воздуха, направленное перпендикулярно аэродинамическим гребням. Технический результат разработки — увеличение надежности работы разгрузочного участка трубопроводного транспорта, уменьшение скорости разгрузки контейнеров и энергозатрат при развороте загруженных контейнеров по винтовой линии вокруг оси транспортного трубопровода.

ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ(✉)
E-mail: davidovtrans@mail.ru**БУСТЕРНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
И ПОДЪЕМА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**© Д. Т. Н. С. Я. Давыдов¹ (✉), Д. Т. Н. В. Н. Макаров¹, Д. Х. Н. Р. А. Апакашев¹,
К. Т. Н. Н. В. Макаров¹, Д. Т. Н. Г. Г. Кожушко²¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия² ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

В литейном цехе Альметьевского насосного завода (г. Альметьевск, Татарстан) в системе пневмотранспорта литейных песков используются бустерные устройства конструкции предприятия «Кристалл-полус» (г. Набережные Челны, Татарстан), установленные по длине транспортного трубопровода. При преимущественном пропуске по нижней внутренней части транспортного трубопровода дополнительного количества сжатого газа экономится его расход и увеличивается дальность транспортирования материала без соприкосновения со стенками трубы. Регулирование поперечного сечения щелевого отверстия, через которое подается дополнительный сжатый газ, позволяет организовать работу системы пневмотранспорта с пониженными затратами сжатого газа. Реализация такого подхода при транспортировании насыпных грузов позволит снижать энергозатраты пневмотранспорта за счет уменьшения расхода воздуха и повышения концентрации груза с понижением его скорости.

В настоящей работе предлагается усовершенствовать использование бустерного устройства для возможности наладки подъемного устройства. Это позволит повысить устойчивость режима и производительность работы, а также сократить энергозатраты.

Суть предложения заключается в создании сплошного кольцевого силового потока в вертикальных транспортных потоках сыпучих и жидких сред. Сплошной кольцевой силовой поток способен обеспечить транспортирование как сыпучих материалов (песок, гравий, щебень и др.), так и жидких сред с крупными включениями. Транспортирующая среда приобретает вращательное и поступательное движение. При этом создается «искусственный вихрь». Этот процесс достигается за счет расположения каналов для подачи дополнительного сжатого воздуха в смесительную ка-

меру под углом $\beta = 60 \div 70$ град, по меньшей мере, в два кольцевых ряда, расположенных один за другим. Это обеспечивает наилучшие условия формирования «искусственного вихря» и устраняет образование локальных завихрений в потоке двухфазной среды. Одновременно образуется зона высокого давления вдоль продольной оси смесительной камеры и обеспечивается более рациональное использование площади его поперечного сечения.

Снижение плотности среды и, как результат, возникновение гидростатической силы, перемещающей пульпу в классическом эрлифте, происходит исключительно за счет смешивания пульпы с воздухом, обладающим малой плотностью. При этом потенциальная энергия воздуха полностью диссипирует в процессе смешивания с пульпой. Применение осе-тангенциально-бустерных устройств, оптимально распределенных по высоте пульпопровода выше смесителя, позволяет не только дополнительно увеличить гидростатическое давление, но и сформировать гидродинамические поверхностные объемные силы для повышения энергоэффективности подъема пульпы при турбовихревом подъеме. Рациональное распределение воздуха, подаваемого в бустерное устройство, позволяет существенно повысить производительность и высоту подъема транспортируемого материала. При фиксированном расходе воздуха увеличение его скорости на выходе из бустерного устройства, например, в 3 раза обеспечивает повышение его гидравлического КПД на 12 %, высоту подъема на 20 %, производительность не менее чем на 10 %.

Предлагаемое устройство может быть использовано для перекачки шлама из буровых скважин, для перемещения абразивных материалов с увеличением пропускной способности и сокращением расхода сжатого воздуха.

ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ(✉)
E-mail: v.b.ponomarev@urfu.ru**РАЗРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННОГО ВОЗДУШНОГО СЕПАРАТОРА
ДЛЯ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ВАНАДИЕВОГО ШЛАКА**© А. В. Катаев¹, К. Т. Н. В. Б. Пономарев¹ (✉), И. В. Постовой²¹ ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет», кафедра оборудования и автоматизации силикатных производств, Екатеринбург, Россия² ООО «Химинжиниринг», Екатеринбург, Россия

Эколого-экономические задачи комплексной переработки минерального сырья и отходов производства обуславливают актуальность переработки шлаков металлургической промышленности. Так как спрос ванадия на мировом рынке постоянно возрастает, шлаки металлургического производства, полученные от переработки уральских титаномагнетитов, широко используют для получения триоксида и пентаоксида

ванадия. Необходимым условием эффективной переработки таких шлаков является требование к фракционному составу. Традиционно в технологическую линию включают операции измельчения продукта до крупности менее 0,2 мм и магнитную сепарацию по дисперсному железу.

По заказу предприятия «Компания «Мария-Трейд» в лаборатории Уральского федерального университета

исследовали молотый ванадиевый шлак после шаровой мельницы, работающей в замкнутом с проходным сепаратором цикле. Производительность линии по исходному сырью составляла 6 т/ч. Фракционный состав молотого шлака приведен ниже:

Сито, мкм.....	500	400	315	200	160	100	80	63	40	-
Частные остатки, %....	1,7	2,7	2,9	2,4	2,3	6,4	5,1	7,9	12,9	55,7

Как показал гранулометрический анализ, исходный материал оказался переизмельченным; средний размер частиц составлял около 33 мкм. Однако кривая распределения имела длинный «хвост» крупных частиц и содержание фракции крупнее 200 мкм составляло 9,2 %, что объясняется присутствием трудноизмельчаемых металлизированных частиц.

Проведенные лабораторные эксперименты показали возможность применения в качестве проходного классификатора для шаровой мельницы центробежного классификатора, разработанного на кафедре оборудования и автоматизации силикатных произ-

водств Уральского федерального университета. Так, при скорости потока на полное сечение лабораторного аппарата 2,11 м/с, содержание фракции крупнее 200 мкм в готовом продукте составило менее 1 % при выходе продукта около 86 %. Расчетная кратность циркуляции материала при работе с мельницей равна 0,176, на основании чего максимальная производительность промышленной установки должна составлять не более 5 т/ч. Согласно техническому заданию были проведено математическое моделирование и конструкторская проработка сепаратора. По рабочим чертежам изготовлен промышленный аппарат, который был встроен в существующую технологическую линию на предприятии «Компания «Мария-Трейд». Как показали промышленные испытания, сепаратор успешно выполняет поставленную задачу. На выходе из технологической линии получается молотый и обезжелезненный ванадиевый шлак, содержащий менее 2 % частиц размером более 200 мкм. Продукт является готовым сырьем для дальнейшей гидрометаллургической переработки.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ШАМОТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ЖАРСТОЙКОГО ФОСФАТНОГО ГАЗОБЕТОНА

✉
E-mail: uralniist@mail.ru

© К. т. н. **В. А. Абызов** (✉), **Н. Е. Посаднова**

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

Номенклатура применяемых в настоящее время высокотемпературных теплоизоляционных материалов сравнительно невелика — обожженные штучные огнеупорные изделия (шамотные ультралегковесные и пенокорунд) и материалы на основе огнеупорных волокон. Производство таких материалов энергоемко, нет возможности из них изготавливать крупно-размерные и сложнофасонные изделия, после обжига изделия требуют калибровки (шлифовки). Более эффективны ячеистые жаростойкие бетоны, особенно газобетон на основе алюмофосфатного связующего и его разновидности, позволяющие изготавливать изделия, не требующие сушки и обжига. Температура применения данного материала, в зависимости от вида заполнителя составляет 1400–1600 °С. Снизить стоимость фосфатного газобетона, улучшить прочностные характеристики можно введением в его состав добавки отходов шамотного производства — пыли с электрофильтров.

В качестве наполнителей использовали шамотный порошок фракции мельче 1 мм, нормальный электрокорунд с размерами зерен менее 0,2 мм, отходы шамотного производства — пыль с фильтров производства шамота с содержанием Al_2O_3 не менее 32 %. Удельная поверхность отходов превышает 3000 $см^2/г$, отходы дисперсны. Отходы слабо обожже-

ны и по составу сложены смесью продуктов обжига и дегидратации огнеупорной глины, что обеспечивает им высокую химическую активность по отношению к фосфатному затворителю. На основе шамотных отходов и ортофосфорной кислоты были получены алюмосиликофосфатные связки со степенью замещения 0,5 и 1. Средняя плотность связующего 1,48–1,52 $г/см^3$. В качестве газообразователя была использована алюминиевая пудра ПАП-2. Огнеупорность вяжущей композиции на основе разработанного связующего и корунда не ниже 1750 °С.

Введение добавки отходов шамотного производства позволило повысить предел прочности шамотного газобетона до 2,2–3,5 МПа при его средней плотности 600–800 $кг/м^3$, корундового — до 2 МПа при средней плотности 600 $кг/м^3$. Термостойкость газобетона при плотности 600 $кг/м^3$ не менее 10 воздушных теплосмен от 800 °С (ГОСТ 20910). Температура применения разработанного жаростойкого газобетона 1400–1500 °С в зависимости от средней плотности и вида заполнителя. Таким образом, газобетон на алюмосиликофосфатном связующем не уступает по температуре применения газобетону на алюмофосфатном.

В настоящее время продолжается изучение жаростойких свойств фосфатного газобетона; они готовятся к апробации в промышленности.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ЖАРОСТОЙКИЙ ВЕРМИКУЛИТОБЕТОН НА ГЛИНОЗЕМИСТОМ ВЯЖУЩЕМ,
МОДИФИЦИРОВАННОМ ШЛАКОМ ФЕРРОТИТАНА**(✉)
E-mail: uralniist@mail.ru© К. Т. н. В. А. Абызов (✉), С. Н. Черногорлов
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск, Россия

Для теплоизоляции в области температур до 1100–1200 °С достаточно широко применяют жаростойкие бетоны на легких заполнителях, особенно на заполнителе из вспученного вермикулита. В качестве вяжущего используют портландцемент, жидкое стекло, глиноземистый цемент (ГЦ); бетоны на ГЦ отличаются наиболее интенсивным твердением. Для снижения себестоимости, расширения номенклатуры сырьевых компонентов в данной работе применялся ГЦ, модифицированный шлаком ферротитана. Исходными материалами служили глиноземистый цемент ГЦ-35 50 по ГОСТ 969–2019 Пашийского цементно-металлургического завода и шлак ферротитана (продукт ППГ-65 Ключевской обогатительной фабрики). По минеральному составу шлак сложен огнеупорными фазами Ca_6 , Ca_2 , шпинелью и перовскитом. Вяжущее получали совместным помолом ГЦ-35 50 и добавки шлака ферротитана. Удельная поверхность модифицированного вяжущего 4200–4700 cm^2/g , сроки схватывания удовлетворяют требованиям ГОСТ 969–2019, предел прочности при сжатии в возрасте 3 сут не менее 50 МПа. Для регу-

лирования сроков схватывания, повышения прочностных показателей в вяжущее помимо шлака вводили добавки солей щелочных металлов и суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов (ПСЕ).

На основе заполнителя из вспученного вермикулита Потанинского месторождения фракций мельче 2 и мельче 5 мм (производитель — предприятие «УралВермикулит») был получен быстротвердеющий легкий бетон со средней плотностью после сушки 450–600 kg/m^3 . Предел прочности при сжатии бетона в возрасте 3 сут 0,5–1,5 МПа. Введение добавок-модификаторов позволило через 24 ч твердения в нормальных условиях получить бетон с пределом прочности при сжатии не менее 80 % прочности бетона после 3-сут твердения. Предельная температура службы бетона не ниже 1100 °С, термостойкость (по ГОСТ 20910–2019) не менее 5 воздушных теплосмен от 800 °С.

В настоящее время в ЮУрГУ (НИУ) проводятся исследования по повышению качества легкого бетона, в НПП «Уралбоксит» (г. Челябинск) выпущена опытно-промышленная партия разработанных материалов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
КАРБИДА ТИТАНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШИБЕРНЫХ ЗАТВОРОВ**(✉)
E-mail: mora1997@mail.ru© М. С. Антипов (✉), А. Д. Прокопец, д. ф.-м. н. П. А. Столин, д. т. н. П. М. Бажин
ФГБН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мержанова
Российской академии наук» (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия

Основная проблема эксплуатации шиберных затворов заключается в небольшом сроке службы огнеупорных плит. При непрерывной разливке стали огнеупорные плиты испытывают экстремальные термические и механические нагрузки и часто выходят из строя, что сопровождается потерями разливаемой стали и остатковой технологического процесса для замены плиты. Это существенно удорожает производство.

Работа посвящена разработке нового металллокерамического материала на основе карбида титана с комплексной связкой из нихрома (ПХ20Н80), полученного в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующего высокотемпературного деформирования в условиях СВС-экструзии. В качестве исходных компонентов использовали порошки титана (56 мас. %), сажи (14 мас. %) и нихрома (30 мас. %). Исходные порошки предварительно перемешивали, прессовали в цилиндрическую заготовку диаметром 28 и высотой 40 мм, массой 78 г. Заготовку устанавливали в пресс-форму, вольфрамовой спиралью инициировали волну горения. Далее проходил СВС и после заданного времени задержки (2–5 с) проводилась экструзия материала через формирующую матрицу диаметрами 2–4 мм.

По данным рентгенофазового анализа установлено, что в зависимости от диаметра полученного стержня фазовый состав и параметры кристаллических решеток не изменяются. В материале содержатся 5 фаз: TiC , $Cr_{0,2}Ti_{0,8}C$, $Cr_{1,12}Ni_{2,88}$, Ni и Cr_3C_2 ; округлые зерна карбида титана расположены в матрице из нихрома ($Cr_{1,12}Ni_{2,88}$) и никеля. Средний размер зерен карбида титана 3,8 мкм. В объеме материала наблюдаются области с упрочняющими фазами карбида хрома и твердого раствора хрома в карбиде титана. Присутствие в материале комплексной матрицы позволяет повысить его жаропрочность и пластичность. Физико-механические свойства полученных металллокерамических материалов находятся на уровне свойств вольфрамовых и безвольфрамовых твердых сплавов. При этом следует отметить, что предел прочности при изгибе материалов зависит от их пористости и составляет от 1080 (при пористости 1,5 %) до 1800 МПа (при пористости < 0,5 %). Поскольку пористость и, как следствие, физико-механические свойства материала, регулируются технологическими параметрами СВС-экструзии, в результате изменения этих параметров можно получать материал с заданной структурой и набором свойств.

Полученный металлокерамический материал предполагается использовать в дальнейшем в качестве электрода для нанесения защитного покрытия методами электроискрового легирования или электродуговой наплавки на поверхность шибера затвора. Как установлено авторами ранее, улучшенные физико-механические характеристики электродного мате-

риала позволяют увеличить в разы износостойкость обрабатываемой детали при ее службе в условиях повышенных температур и агрессивных сред.

* * *

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

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСТРУКЦИИ ЖАРСТОЙКОГО ШАМОТНОГО БЕТОНА ПРИ ЕГО РЕЗКОМ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

(✉)
E-mail: rimvydas.stonys@vgtu.lt

© Д. т. н. В. Антонович¹, П. Зданявичюс¹, д. т. н. Р. Стонис¹ (✉), д. т. н. Э. Спудулис¹, д. т. н. А. Корякин², д. т. н. Г. Шахменко², д. т. н. А. Татаринов²

¹ Институт строительных материалов, Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Вильнюс, Литва

² Институт материалов и конструкций, Рижский технический университет, Рига, Латвия

Резкие колебания температуры приводят к термическим напряжениям в огнеупорном материале и, как следствие, к образованию микро- и макротрещин, а также к ухудшению его механических характеристик. В данной работе после воздействия термических ударов исследовали деструкцию жаростойкого шамотного бетона различного класса: низкоцементного и среднецементного с добавкой кварцевого песка (для увеличения щелочной стойкости) и с добавкой металлической фибры (для умень-

шения трещинообразования). Использовали два метода определения термостойкости бетона, в которых деструкцию материала оценивали с помощью ультразвука: методом «водоохлаждаемой плиты» и методом одностороннего нагрева-охлаждения. Исследования, проведенные с помощью метода одностороннего нагрева-охлаждения, выявили образование макротрещин в образцах низкоцементного бетона. Этот метод оказался также более чувствительным при оценке деструкции бетона.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАРЦЕВОГО ОГНЕУПОРА С АЛЮМИНИЕМ И ЕГО СПЛАВАМИ

(✉)
E-mail: parknedra@yandex.ru

© Д. х. н. Р. А. Апакашев (✉), д. т. н. С. Я. Давыдов, д. т. н. М. Л. Хазин, д. т. н. С. Н. Красиков ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», кафедра химии, Екатеринбург, Россия

Для плавки цветных металлов и сплавов на их основе используют тигли из различных материалов. Для повышения стойкости внутреннюю поверхность тиглей часто покрывают огнеупорными обмазками, в состав которых входит кварцевый песок. При этом остается неучтенным возможное взаимодействие металлического расплава с компонентами защитной обмазки. Так, термодинамический анализ системы Al-SiO₂ свидетельствует о протекании реакции восстановления кремния из его оксида расплавленным алюминием. Практическая реализация такого взаимодействия используется для получения алюминиево-кремниевых сплавов за счет растворения в алюминии кремния, восстановленного из кремнезема.

В настоящей работе исследовали контактное взаимодействие расплавленного алюминия марки А0, алюминиевого сплава АМГ6 и литейной бронзы БрА9ЖЗЛ с диоксидом кремния. Плавление алюминия и его сплавов проводили в алундовом тигле при температуре на 50–70 К выше их температуры плавления. При нагревании сплава АМГ6 создавали восстановительную среду, помещая рабочий тигель с металлическим расплавом в закрывающийся крышкой внешний защитный тигель с угольной засыпкой. При проведении экспериментов контакт исследуемых металлических расплавов с диоксидом кремния обеспечивали, погружая в расплав

нагретую до температуры расплава цилиндрическую трубку из кварцевого стекла. Длина трубки превышала высоту уровня расплава в тигле. Площадь контакта металлического расплава с кварцевой поверхностью не менее 40 см² с учетом внутренней и внешней поверхности трубки, длительность контакта до 1,5 мин. После выдержки кварцевой трубки в расплаве тигель охлаждали на воздухе до комнатной температуры. Для проведения дальнейших исследований из средней части полученных металлических слитков вырезали цилиндрические образцы высотой 15 и диаметром 20 мм.

Структуру и химический состав полученных образцов алюминия и его сплавов регистрировали с помощью растрового электронного микроскопа, интегрированного с микрорентгеноспектральным энергодисперсионным анализатором, а также с помощью атомной силовой микроскопии. Установлено, что высокотемпературный контакт расплавов с поверхностью кварцевой трубки сопровождается восстановлением кремния из соответствующего оксида. По данным электронной микроскопии, наибольший линейный размер образующихся в металлическом расплаве частиц кремния до 3 мкм. По результатам энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, выявлено, что микрочастицы кремния содержат матричный металл. Согласно результатам микро-

скопического анализа содержание кремния в частице составляет 97–98 %. При этом содержание растворенного кремния, например, в исследованном алюминии отмечено на уровне 1,82 %. Массовая доля кремния в исходном алюминии марки А0 не более 0,95 %. Превышение этой величины свидетельствует о протекании процесса растворения гетерогенных частиц кремния, образующихся в расплавленном металле при восстановлении из диоксида кремния. Присутствие этих частиц в объемной структуре металлического материала свидетельствует об образовании дисперсно-армированного металломатричного композиционного материала. По результатам рентгеновского микроанализа, массовая доля этих частиц в композиционном материале может достигать 30 %.

Полученные результаты экспериментальных исследований были сопоставлены с теоретическим анализом термодинамических параметров высокотемпературных физико-химических процессов в изученных системах цветной металл / сплав – диоксид кремния. Термодинамическое моделирование процессов проводили с помощью программного обеспечения для термодинамических расчетов HSC Chemistry. По результатам анализа, отмечена корреляция результатов экспериментальных исследований и термодинамических расчетов.

Исследования проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения базовой части государственного задания.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ В КОКСОПЕКОВЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

(✉)
E-mail: beilinan@mail.ru

© Д. т. н. **Н. Ю. Бейлина** (✉), **А. В. Петров**, **Н. С. Стариченко**

АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», Москва, Россия

Наполнителем для большинства углеродных композиционных материалов являются коксы, получаемые из нефтяных, каменноугольных и сланцевых смол, а также природные графиты и сажи. Стойкость углеродных материалов (анодов и катодов алюминиевых электролизеров, искусственных конструкционных графитов, графитированных электродов электросталеплавильных печей) в разных средах выше 1500 °С, а также их плотность и термочувствительность определяются взаимодействием коксов разной с природы пеками в высоконаполненных коксопексовых композициях с содержанием наполнителя 60–75 мас. %. Установлено, что коксы с лучшей смачиваемостью поверхности пеком обладают большей адсорбционной способностью и лучше спекаются с пеком при его карбонизации.

Спекание в объеме коксопексовой композиции осуществляется в области карбонизации связующего в интервале 400–1200 °С и зависит от природы наполнителя, его удельной поверхности, смачиваемости его пеком-связующим и характера реакций взаимодействия компонентов связующего с поверхностью наполнителя. Авторами было показано, что при развитой удельной поверхности наполнителя взаимодействие пека с порошками, частицами и пористой основой кокса носит молекулярно-ситовой характер. Молекулы пека разных размеров и конфигураций, различающиеся полярностью, по-разному сорбируются пористой поверхностью наполнителя. Часть низкомолекулярных соединений пека необратимо сорбируется в порах наполнителя и при карбонизации образует не только летучие продукты разложения, но и коксовый остаток. Фракции пека с молекулярной массой выше 380 а. е. м. необратимо сорбируются в порах и на поверхности кокса. Плотность и прочность кокса из связующего зависит от группового состава пека и его перераспределения

на поверхности и в порах кокса. При этом реакции отдельных компонентов и фракций пека на поверхности кокса-наполнителя следует считать топомеханическими. Чем более развита поверхность кокса при его предварительном тонком помоле, тем более полно протекают реакции разложения-поликонденсации связующего, способствуя выделению повышенного количества летучих продуктов (CO₂, CO, CH₄, H₂), увеличению усадки из композиции, ее уплотнению и упрочнению.

На характер выделения продуктов разложения связующего (их качественный и количественный составы) существенно влияет также температура обработки (прокаливания) исходного кокса-наполнителя. Для композиции пека с непрокаленным коксом характерно выделение большего количества водорода. Причем реакции дегидрирования начинаются при 500 °С и заканчиваются выше 1000 °С, а в композициях с прокаленным коксом водород выделяется в более узком интервале (600–850 °С). Общее количество выделившегося метана в композициях с непрокаленным коксом выше и максимумы газовой выделенности приходятся на область 500–750 °С. Из композиции с прокаленным коксом весь метан выделяется уже до 850 °С, а максимум скорости газовой выделенности наблюдается в области 720 °С.

Благодаря большей роли реакций конденсации, протекающих с выделением водорода в широком температурном интервале, углеродные материалы из непрокаленного кокса отличаются более высокими плотностью и прочностью, чем материалы на основе прокаленного кокса. В ряду материалов из анизотропного, рядового и изотропного кокса при одинаковой плотности прочность графитированного материала растет благодаря повышению спекаемости композиций и их высоким усадочным характеристикам.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ФОРСТЕРИТОВЫЙ БЕТОН ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ
ОТХОДОВ КОВДОРСКОГО ГОКА**(✉)
E-mail:
belog_oa@chemy.kolasc.net.ru© К. т. н. **О. А. Белогурова** (✉), **М. А. Саварина**, **Т. В. Шарай**

ФГБУН «Институт химии и технологии редкоземельных элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН», г. Апатиты Мурманской обл., Россия

Основное направление в стратегии долгосрочного недропользования — получение материалов из минерально-сырьевых ресурсов техногенных скоплений. К числу факторов, увеличивающих затраты на разработку техногенных месторождений и определяющих отсутствие заинтересованности потенциальных инвесторов в их разработке, относятся: более низкое качество техногенного сырья по сравнению с природными месторождениями; сложность и высокая стоимость извлечения твердых компонентов, обусловленные физико-химическими свойствами сырья; невостребованность определенных видов сырья при наличии существенных объемов; экологические риски. В результате отходы добычи минерального сырья используются неэффективно.

Технология обогащения комплексных железных руд Ковдорского месторождения предусматривает последовательное выделение железорудного (магнетитового), апатитового и бадделеитового концентратов. Отходы обогатительного производства представлены (мас. %): форстеритом (38–48), кальцитом (21–30), флогопитом (10–11) и неизвлеченной частью основных продуктов.

Цель исследования — разработка технологии бетона из форстеритового концентрата Ковдорского ГОКа на магнезиальном цементе. Состав шихты для брикета, мас. %: форстеритовый концентрат фракции мельче 0,2 мм 50, мельче 0,063 мм 15, бой магнезитовых изделий (< 0,2 мм) 35. Вяжущими компонентами для бетонов из форстеритового концентрата как сырого, так и брикетированно-

го служили каустический магнезит и химическая связка из гидратной соли соляной кислоты. На рентгенограммах образцов бетона присутствуют линии магнезиальных оксихлоридных соединений: $Mg_3(OH)_5Cl(H_2O)_4$ (на основе сырого форстеритового концентрата), $Mg_3(OH)_5Cl(H_2O)_4$ и $Mg_2(OH)_3Cl(H_2O)_4$ (на основе брикета), $Mg_3(OH)_5Cl(H_2O)_4$ и $Mg_3(OH)_4Cl_2(H_2O)_4$ (при использовании совместного помола брикета и каустического магнезита), а также оксида магния.

Выявлены экспериментальные зависимости прочности форстеритового бетона от количества каустического магнезита и тонкой фракции наполнителя в шихте, плотности водного раствора гидратной соли. Отмечено, что с увеличением концентрации каустического магнезита в составе магнезиального цемента прочность бетона как из сырого форстеритового концентрата, так и из брикета возрастает. Повышение плотности водных растворов химической связки из гидратной соли соляной кислоты также позволяет увеличить этот показатель.

Прочность бетона из сырого форстеритового концентрата возрастает с увеличением количества тонкой фракции наполнителя (< 0,063 мм) только при использовании в шихте 35 мас. % каустического магнезита. Бетон из шихты, содержащей 20 мас. % брикета фракции мельче 0,063 мм, обладал пределом прочности при сжатии 50 МПа, тогда как при использовании смеси совместного помола каустического магнезита и брикета $\sigma_{сж}$ возрос до 80 МПа. Рекомендуемая плотность водного раствора $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 1,259 г/см³.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА ПЛАЗМЕННО-НАПЫЛЕННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**(✉)
E-mail: belyaev-iv54@yandex.ru© Д. т. н. **И. В. Беляев**¹ (✉), **А. В. Киреев**¹, **Н. И. Шалаев**¹, к. т. н. **А. Б. Люхтер**²,
А. В. Жокин², **В. В. Рыков**²¹ ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых», г. Владимир, Россия² Научно-образовательный центр внедрения лазерных технологий (НОЦ ВЛТ), г. Владимир, Россия

Исследовали возможность лазерной резки плазменно-напыленных огнеупорных изделий из оксида алюминия. Для отработки режимов резания использовали промышленный лазерный комплекс КС-5ВДМ1-3 «Навигатор» фирмы VNITEP (Россия), оснащенный иттербиевым волоконным лазером ЛС-3 мощностью 3 кВт. Изделия до и после лазерной резки изучали методами оптической металлографии и количественного рентгенофазового анализа. Установлено, что сразу после завершения процесса плазменного напыления фазовый состав изделий представляет собой набор различных модификаций Al_2O_3 . Последующий нагрев этих изделий приводит к серии полиморфных превращений, сопровождающихся изменениями объема и плотности. Процесс завершается, когда все полиморфные модификации Al_2O_3 перейдут в единственную устойчивую фазу —

$\alpha-Al_2O_3$ (корунд). Показано, что лазерная резка плазменно-напыленных изделий из Al_2O_3 возможна лишь тогда, когда процесс перехода всех его фазовых модификаций в корунд полностью завершен. В противном случае резкое изменение объема изделия, вызванное полиморфными превращениями, протекающими в условиях высокого градиента температуры при лазерной резке, приведет к разрушению изделия; оно просто ломается. Плазменно-напыленное огнеупорное изделие, материал которого полностью представляет собой $\alpha-Al_2O_3$, не боится высоких градиентов температур и легко поддается лазерной резке без разрушения. Режимы резания могут варьироваться в широких пределах. Технология резания освоена на базе Научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий при Владимирском государственном университете.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

**ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИКИ ИЗ ХИМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО
КАРБИДА ТАНТАЛА**

(✉)
E-mail: 987ilya@gmail.com

© **И. М. Беляев**¹ (✉), к. х. н. **П. В. Истомин**¹, к. х. н. **Е. И. Истомина**¹, к. т. н. **А. С. Лысенков**²

¹ ФГБУН «Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН», г. Сыктывкар, Россия

² ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН», Москва, Россия

Карбиды тугоплавких переходных металлов IVB–VB групп характеризуются высокими температурами плавления и поэтому представляют интерес в качестве материалов, применяемых для службы в условиях сверхвысоких температур. Тугоплавкость, износостойкость, высокие твердость и прочностные характеристики позволяют рассматривать эти карбиды в качестве материалов для применения в экстремальных и жестких условиях эксплуатации.

В данной работе получены образцы плотной керамики из химически модифицированных порошков карбида тантала. Процесс химической модификации заключался в высокотемпературном силицировании исходных порошков TaC в газовой атмосфере монооксида кремния SiO. Установлено, что продуктами такого сили-

цирования являются силициды Ta₅Si₃ и TaSi₂. Далее химическую модификацию проводили таким образом, чтобы в конечном продукте образовывалась только фаза TaSi₂ без присутствия Ta₅Si₃. Затем модифицированные порошки с разным содержанием силицидных фаз подвергали спеканию методом горячего прессования при 1700 °С и прикладываемом давлении 25 МПа в течение 1 ч. В ходе горячего прессования проанализирована динамика спекания и уплотнения порошков. Полученные образцы керамики испытывали на прочность, трещиностойкость и микротвердость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19-08-00131.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

**ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ
МАХ-ФАЗ ИЗ ЛЕЙКОКСЕНОVOГО КОНЦЕНТРАТА**

(✉)
E-mail: istomina-ei@yandex.ru

© **И. М. Беляев**¹ (✉), к. х. н. **П. В. Истомин**¹, к. х. н. **Е. И. Истомина**¹, к. т. н. **А. С. Лысенков**²,
А. В. Надуткин¹, **В. Э. Грасс**¹

¹ ФГБУН «Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН», г. Сыктывкар, Россия

² ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН», Москва, Россия

По комплексу свойств кремнийсодержащие МАХ-фазы Ti₃SiC₂ и Ti₄SiC₃ лучше других материалов подходят для работы в жестких условиях, предполагающих совместное действие высоких температур, агрессивных сред и ударных механических и термических воздействий. Одним из перспективных подходов к синтезу этих соединений является недавно разработанный авторами метод карбосиликотермического восстановления оксида титана с использованием карбида кремния в качестве восстановителя. Важными аргументами в пользу этого подхода являются широкая доступность и низкая стоимость оксидного сырья по сравнению с бескислородными прекурсорами, традиционно используемыми для синтеза МАХ-фаз, что дает значительные конкурентные преимущества получаемым материалам. В настоящей работе в качестве исходного оксидного сырья для получения МАХ-фаз использован лейкоксеновый концентрат (Ярегское месторождение, Республика Коми), содержащий TiO₂ и SiO₂ в количестве 53 и 38 мас. %, соответственно. Следует ожидать, что уникальное субмикроструктурное строение лейкоксена, проявляющееся в ультратонком взаимном прорастании титан- и кремнийсодержащих минералов, способствует

синхронизации химических процессов, происходящих при высокотемпературной восстановительной переработке лейкоксенового сырья. Это позволяет обеспечить условия для роста наноламинатных кристаллических структур, образованных по типу МАХ-фаз, не реализуемые в простых механических смесях.

Синтез керамических композиций Ti₃SiC₂–Ti₄SiC₃–SiC проводили при 1600 °С в условиях непрерывной вакуумной откачки газообразных продуктов в лабораторном реакторе секционного типа. Конструкция реактора позволяла регулировать истечение газообразных продуктов (СО и SiO) из реакционного объема, а также улавливать газ SiO, покидающий пределы реакционной зоны, путем его химического связывания с твердотельным поглотителем — активированным углем. Синтезированные композиции Ti₃SiC₂–Ti₄SiC₃–SiC спекали методом одноосевого горячего прессования при 1700 °С и давлении 40 МПа. Исследованы микроструктура и прочностные характеристики полученной керамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-48-110001 p_a.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ(✉)
E-mail: dina-brazhnik@ukr.net**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЕ И АКТИВИРУЮЩИХ ДОБАВКАХ**© К. т. н. **Д. А. Бражник** (✉), к. х. н. **Г. И. Гурина**, **М. В. Смирнова**
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова,
кафедра химии и интегрированных технологий, г. Харьков, Украина

Развитие украинской промышленности в наше время диктует необходимость проведения импортозаметы и расширения производства качественных огнеупорных материалов и вяжущих. Для футеровки высокотемпературных агрегатов черной и цветной металлургии значительный интерес представляют разработка периклазоуглеродистых материалов, а также технологии их изготовления в виде неформованных огнеупорных материалов с высокими прочностью, огнеупорностью и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Это составляет основу для дальнейшего внедрения периклазоуглеродистых материалов в производство, их развития и, возможно, последующего изучения.

Проведенными термодинамическими исследованиями было установлено, что при введении в периклазоуглеродистые материалы органо-неорганических комплексов, которые включают алкоксид кремния и неорганические и/или органические соли никеля, с антиоксидантом (Al) образуется комплексный антиоксидант $Al + SiC + Ni(NiO)$, компоненты которого сосуществуют с периклазом и углеродом и могут использоваться для защиты периклазоуглеродистых огнеупоров от окисления. С точки зрения термодинамики, это объясняется тем, что в рассматриваемой четырехкомпонентной системе

оксидов никеля, магнезия, алюминия и кремния периклазоуглеродистый материал сосуществует со шпинелью и оксидом никеля до 1287 К, а выше 1287 К появляется также N_2S . С учетом значительного количества образующейся шпинели (которая, возможно, образуется в недостаточном количестве в процессе службы периклазоуглеродистого материала с комплексным антиоксидантом) предполагается, что будет наблюдаться качественное улучшение комплекса физико-механических свойств разрабатываемого периклазоуглеродистого материала, приводящее, в частности, к увеличению его стойкости к металлу и шлаку.

Авторы исследовали физико-механические свойства периклазоуглеродистых материалов на основе фенолоформальдегидной смолы с использованием никельобразующих активирующих добавок и установили положительное влияние органо-неорганических комплексов никеля при технологических переделах получения периклазоуглеродистых огнеупоров. Установлено, что наиболее плотными и прочными получаются образцы периклазоуглеродистых материалов, полученные на основе модифицированной фенолоформальдегидной смолы с помощью прекурсоров никеля. Предел прочности при сжатии таких материалов достигает 55 МПа, при этом их открытая пористость не ниже 8 %.

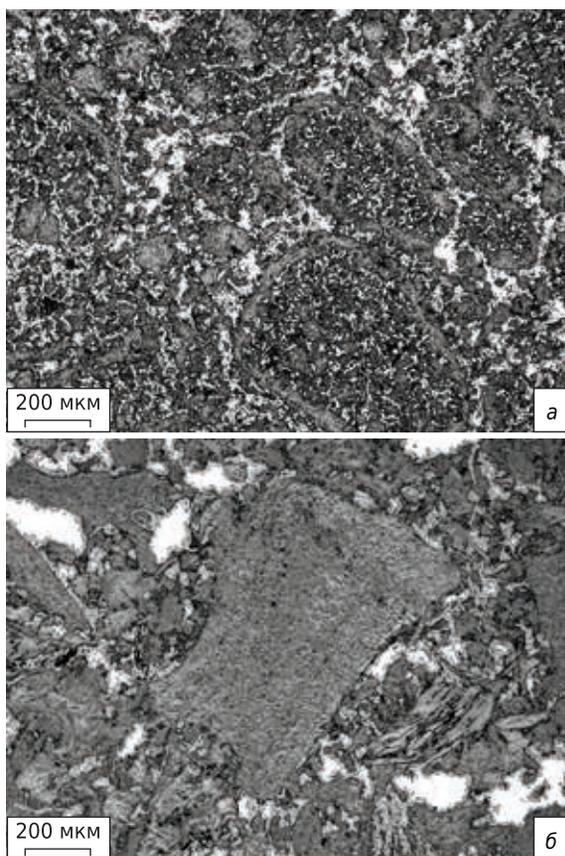
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ(✉)
E-mail: i.bubnenkov@mail.ru**НОВЫЙ СИЛИЦИРОВАННЫЙ ГРАФИТ КЛАССА СГМ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ**© **И. А. Бубненко** (✉), **Ю. И. Кошелев**, **В. В. Волков**, **Д. Б. Вербец**, **Е. Г. Чеблакова**,
В. И. Сапожников, **Д. Ю. Сеницын**АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита
«НИИГрафит», Москва, Россия

Одним из возможных применений силицированного графита с графитовым каркасом (СГМ – силицированный графит мягкий) являются защитные наконечники термопар погружения. Более высокое содержание углерода в составе силицированного графита повышает его стойкость к теплосменам, а более низкое, наоборот, снижает. В то же время наибольший износ претерпевает участок поверхности наконечника на границе воздух–расплав вследствие окисления материала, в первую очередь его графитовой составляющей.

Ранее было установлено, что скорость износа наконечников из силицированного графита СГМ закономерно уменьшается с увеличением степени пропитки кремнием от 39 до 65,5 %, что практически означает рост содержания карбида кремния в материале. Кроме того, экспериментально показано, что износ наконечников термопар погружения по диаметру при использова-

нии силицированного графита марки СГТ с карбидной матрицей (силицированный графит твердый), меньше, чем у СГМ. Таким образом, вероятно, что наиболее оптимальный химический состав силицированного графита для защитных наконечников должен включать достаточно высокое содержание графита, которое определяет термостойкость, и одновременно повышенное содержание карбида кремния (по сравнению с материалом СГМ). Это обеспечит уменьшению скорости окисления, а также снижение содержания остаточного кремния при условии наличия тонких капилляров в исходном графите. Остаточный кремний при использовании силицированного графита на контакте с расплавами как черных, так и цветных металлов способен взаимодействовать с образованием силицидов разного состава.

Было также установлено, что уменьшение среднего размера пор менее 1 мкм в исходном графите для



силицирования приводит к значительному снижению выхода годных деталей, а графит, имеющий порядка 66 % пор размерами менее 1 мкм, не пропитывается жидким кремнием. Все детали, изготовленные из этого графита, имели плотность меньше регламентированной (2,3 г/см³) и были забракованы при рентгеновском контроле по наличию непротитированных участков. Таким образом, для эффективной пропитки кремнием и обеспечения качества и выхода годных силицированных деталей пористая структура мелкозернистого графита должна иметь равномерное распределение пор с преобладающими размерами 1–10 мкм и минимальное количество пор размерами менее 1 мкм.

Применение искусственного наполнителя с заданными характеристиками пористой структуры позволили создать материал с графитокремниевым каркасом, в котором равномерно распределены по объему карбид кремния и графит (см. рисунок, а). Для силицированного материала из среднезернистого графита (СЗГ) на основе пекового кокса АО «Евраз НТМК» характерно присутствие практически не пропитанных кремнием графитовых зерен (см. рисунок, б). Это связано с низкой открытой пористостью этого материала и значительным количеством пор размерами менее 1 мкм.

Таким образом, проведенные лабораторные исследования и опытно-промышленная отработка показали возможность создания силицированного графита класса СГМ с графитокремниевой матрицей для получения защитных наконечников термодпар погружения.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

СИНТЕЗ МАХ-ФАЗЫ Ti₂AlN ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ ИЗ СМЕСИ Ti/AlN



E-mail: xray@pm.pstu.ac.ru

© К. т. н. **В. Г. Гилев** (✉), д. т. н. **С. А. Оглезнева**, к. т. н. **М. Н. Каченюк**, к. т. н. **А. А. Сметкин**
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
г. Пермь, Россия

Для синтеза МАХ-фазы Ti₂AlN применяют разные методы. В настоящей работе в качестве исходных материалов для синтеза Ti₂AlN использовали порошок титана ТПП-7 фракции мельче 325 мкм и два порошка AlN: AlN-1 (<58 мкм, d(4/3) = 11,46 мкм, d₅₀ = 8 мкм) и AlN-2 (<69 мкм, d(4/3) = 20,7 мкм, d₅₀ = 17,2 мкм). Порошки подвергали механоактивации (МА) и искровому плазменному спеканию (ИПС). Химический состав порошков AlN, определенный с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентной спектрометра EDX-800HS, различался незначительно (табл. 1).

В порошке AlN-1 рентгенографически определяются примеси алюминия (~7 мас. %) и байерита Al(OH)₃ (~7 мас. %), в порошке AlN-2 эти примеси (Al и его гидроксид) отсутствуют.

Степень гомогенизации смеси Ti/AlN в ходе МА оценивали по результатам рентгенофазового анализа. Соотношения AlN/Ti, определенные методом полнопрофильного анализа после 3-ч МА, для смесей Ti/AlN-1 и Ti/AlN-2 составляли соответственно 0,56 и 0,70; качество МА смеси с AlN-2 хуже. Однако применение более чистого порошка AlN-2 способствовало получению более плотных и термически стабильных материалов, о чем свидетельствуют данные о потере массы образцов (Δm) в ходе ИПС, плотности (ρ), открытой пористости (P_o) и доли МАХ-фазы в составе (табл. 2).

Более чистый продукт с 97–98 мас. % Ti₂AlN получен при 1300 °С. При повышении температуры до 1350–1400 °С наблюдаются снижение доли Ti₂AlN

Таблица 1

Порошок	Массовая доля, %											
	Al	Ti	Fe	Cr	Mn	Cu	Ni	Zn	Mo	Zr	Rb	
AlN-1	99,31	–	0,54	0,06	0,05	0,03	0,02	–	–	–	–	
AlN-2	98,02	1,22	0,44	0,06	0,08	0,02	–	0,04	0,03	0,02	0,01	

Таблица 2

T _{ИПС} , °С	Образцы с порошком АIN-1					Образцы с порошком АIN-2				
	Δt, %	ρ, г/см ³	Π _о , %	HV ₅₀	доля Ti ₂ AIN	Δt, %	ρ, г/см ³	Π _о , %	HV ₅₀	доля Ti ₂ AIN
900	0	3,29	16,2	–	18	0	3,45	–	–	20
1000	0	3,69	10,7	–	40	0	3,66	12,4	–	52
1100	–1,1	4,10	2,4	–	64	0	4,13	1,07	–	69
1200	–4,1	4,24	1,9	6,8±1,1	89	–1	4,27	0,054	6,8±0,76	91
1300	–5,6	4,26	1,9	6,7±0,65	90	–	4,336	0,005	4,7±0,28	97±1
1350	–25,4	4,30	2,5	–	88	–3	4,358	0,154	–	92
1400	–34,7	4,36	2,8	–	75	–5,3	4,33	0,48	–	89

вследствие разложения Ti₂AIN с образованием TiN, потери массы и появления пористости. Химический состав образцов на глубине 1 мм и на их поверхности при температурах ИПС и оптимальных (1200–1300 °С) различается. Параметры кристаллической решетки Ti₂AIN (с АIN-2) после ИПС при 1300 °С на поверхности

до глубины 1 мм изменяются: а от 0,299 до 0,2987 нм, с от 1,361 до 1,363 нм.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-48-590547 р_а.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ОГНЕУПОРНЫЙ МАТЕРИАЛ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТОГО СОСТАВА ДЛЯ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

✉
E-mail: chemic@yandex.ru

© **Е. В. Голобурда**, 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

Футеровка сталеразливочных ковшей и кислородных конвертеров обеспечивает до 60 % всех затрат на огнеупоры в черной металлургии. При этом шлаковая коррозия является одной из основных причин вывода из эксплуатации на холодный ремонт футеровки сталеразливочных ковшей для замены ее рабочего слоя. Одним из современных и эффективных методов повышения ресурса рабочего слоя футеровки является торкретирование (шоткретирование) с применением огнеупорной массы высокоглиноземистого состава с разными добавками. При этом в последние годы расширяются производство и применение неформованных огнеупорных материалов, в том числе торкрет-масс и огнеупорных бетонов.

На кафедре химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов СПбГТИ (ТУ) разработан программный комплекс для оценки равно-

весного фазового состава в субсолидусной области и температуры ликвидуса сталеплавильных шлаков и систем типа шлак–огнеупор в рамках многокомпонентной оксидной системы CaO–MgO–SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–Cr₂O₃. Программный комплекс предназначен для количественной оценки взаимодействия металлургических шлаков с огнеупорными материалами футеровки сталеразливочных ковшей, для оценки температуры появления расплава в системах типа шлак–огнеупор, прогноза агрессивности шлаковых расплавов по отношению к огнеупору в заданном интервале температур. Кроме того, программный комплекс может быть использован при проектировании химического и фазового составов формованных и неформованных огнеупоров, а также ремонтных смесей для торкретирования (шоткретирования) рабочего слоя футеровки металлургических агрегатов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

РАЗРАБОТКА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ И ГЛИНОЗЕМИСТЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ

✉
E-mail: husarusv@mail.ru

© **С. В. Гусаров** ✉, к. т. н. **К. Б. Подболотов**, **Н. А. Хорт**

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время почти все отрасли промышленности связаны с высокотемпературными процессами, требующими применения огнеупорных изделий. Крупногабаритные огнеупорные изделия сложной конфигурации формируют преимущественно методом вибролитья. Невысокое содержание цемента в составе смеси позволяет без ухудшения высокотемпературных свойств использовать разные огнеупорные заполнители. Наибольшее распространение получили алюмосиликатные огнеупоры на основе шамота.

В данной работе для получения огнеупорных материалов применяли следующие компоненты: шамот марки ША, огнеупорную глину марки ПГБ, глиноземистый цемент марки ГЦ-40, муллитосодержащие отходы машиностроительной отрасли в виде боя форм, предназначенных для литья жаропрочных сплавов. Бой измельчали в лабораторной мельнице до прохождения через сито с размером ячейки 0,315 мм. Для исследования были выбраны составы, содержащие 0–100 % алю-

мосиликатного шамота, 0–100 % муллитосодержащих отходов и 0–15 % цемента ГЦ-40 от массы сухой смеси. Кажущуюся плотность, водопоглощение и открытую пористость испытуемых образцов определяли по ГОСТ 2409–95, прочность образцов при сжатии — по ГОСТ 10180–2012.

При проведении экспериментальной работы установлены зависимости физико-химических характеристик материала от соотношения исходных компонентов. Установлено, что при увеличении содержания в смеси муллитосодержащих отходов до 30 % за счет более плотной упаковки частиц и армирования структуры повышаются плотность (до 2003 кг/м³) и прочность материала (до 57 МПа). Однако увеличение содержания в смеси мелкой фракции ведет к значительному изменению размеров и высокой усадке обожженных изделий. Изделия с малым содержанием цемента ГЦ-40 (до 10 %) имеют более высокую прочность после обжига, однако низкую прочность сырца.

Показано, что предел прочности при сжатии образцов, обожженных при 1100 и 1200 °С, составляет 12 и 18 МПа соответственно; повышение температуры до 1300 °С увеличивает прочность в 1,5–2,0 раза. Это

можно объяснить структурно-фазовыми изменениями, протекающими в процессе спекания. При 1300 °С происходит взаимодействие оксида кремния и аморфной составляющей в составе муллитосодержащих отходов с компонентами смеси с образованием первичного муллита. Этот процесс приводит к разрушению связки волокон муллита в структуре отходов и обеспечивает их подвижность, а образование первичного муллита приводит к зарастанию пор.

Для производства огнеупорных керамических материалов методом вибролитья можно рекомендовать состав смеси, включающий 70–90 % алюмосиликатного шамота, 10–30 % муллитосодержащих отходов, 10 % цемента ГЦ-40 от массы сухой смеси. Огнеупорный материал, полученный из смеси этого состава, обладает следующими свойствами: плотность 1900–2003 кг/м³, открытая пористость 27–30 %, предел прочности при сжатии 37–57 МПа, водопоглощение 13–15,5 %, усадка 0–2,5 % при температуре обжига 1300 °С.

Разработанный состав можно применять для изготовления крупногабаритных огнеупорных изделий и изделий сложной конфигурации для футеровки, а также ремонта тепловых агрегатов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: pivinski@mail.ru

ВКВС КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА В СИСТЕМЕ СПЕЧЕННЫЙ ГЛИНОЗЕМ BSA 96–ВДКС

© П. В. Дякин, д. т. н. Ю. Е. Пивинский (✉)

ООО «НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

Высококонтрированные керамические вяжущие суспензии (ВКВС) композиционного состава в системе боксит–высокодисперсное кварцевое стекло (ВДКС) нашли широкое применение в производстве керамобетонов для черной металлургии. Улучшение эксплуатационных свойств керамобетонов этого класса возможно за счет уменьшения содержания в них стеклофазы и примесей, т. е. при использовании более чистого материала, например спеченного глинозема BSA 96. Предполагается, что корундомуллитовая матричная система на основе ВКВС композиционного состава в системе спеченный глинозем BSA 96–ВДКС в сочетании с корундовым наполнителем позволит получить керамобетоны с улучшенными термомеханическими свойствами. Следует отметить, что при получении ВКВС в процессе мокрого измельчения происходит «наработка» наночастиц, которые равномерно распределяются в объеме материала. Кроме того, полидисперсность частиц в сочетании с оптимальными реотехнологическими свойствами позволяет получать плотную упаковку частиц с низкой пористостью матричной системы.

В исследовании была поставлена задача — изучить возможность получения ВКВС композиционного состава с преимущественным содержанием (90–92 %) спеченного глинозема BSA 96 (96,4 % Al₂O₃, 1,2 % TiO₂, 0,9 % SiO₂, 0,23 % R₂O, 0,13 % Fe₂O₃, 8–10 % ВДКС) по аналогии с известной технологией получения ВКВС в системе боксит–ВДКС. При этом применяли процесс совместного мокрого измельчения спеченного глинозема

BSA 96. Исходный зерновой состав спеченного глинозема BSA 96 характеризовался полидисперсностью, медианным размером частиц d_m 0,08 мм, насыпной плотностью 2,45 г/см³. Второй компонент — ВДКС, вводимый в количестве 8 мас. %, характеризовался d_m 3,0 мкм с преимущественным содержанием частиц размера менее 7 мкм.

Одностадийный процесс совместного мокрого измельчения проводили в промышленной шаровой мельнице (объем 3,5 м³) с высокоглиноземистой футеровкой и мелющими телами. Осуществляли контроль следующих параметров: pH, плотности, вязкости η , температуры, остатка на сите с размером ячейки 0,063 мм $R_{0,063}$. Для разжижения (дефлокуляции) вводили незначительное количество жидкого стекла плотностью 1,25 г/см³. Кинетику мокрого измельчения изучали изменением $R_{0,063}$ от времени. Показатели $R_{0,063}$ после 5, 10, 15, 20 и 25 ч измельчения составляли 20, 15, 10, 5 и 1,1 % соответственно. Среднее время получения ВКВС композиционного состава в системе спеченный глинозем BSA 96–ВДКС 25 ч. Следует отметить, что у полученных ранее ВКВС в системе электрокорунд–ВДКС среднее время измельчения составляло около 30 ч. На конечной стадии процесса получения ВКВС характеризовалась плотностью 2,77 г/см³ (что соответствует $C_V = 0,65$ или влажности 12,6 %), $R_{0,063}$ 1,1 % и η 14 Е. Химический состав ВКВС состава BSA 96–ВДКС, %: Al₂O₃ 87,1, SiO₂ 8,3, TiO₂ 1,3, Fe₂O₃ 0,22, R₂O 0,4, MgO 1,55.

Изучены реологические свойства ВКВС, показан их тиксотропно-дилатантный характер поведения. Диламетрическим методом исследовано влияние не-изотермического нагрева образца матричной системы на изменения линейных размеров, определены три интервала температур: теплового расширения I, спекания или усадки II, муллитизации и роста III. Изучено влияние температуры обжига (1000–1400 °C с выдержкой 5 ч) на усадку, рост, открытую пористость, кажущуюся плотность, предел прочности при изгибе

$\sigma_{изг}$ и сжатии $\sigma_{сж}$. Установлено, что максимальные значения как $\sigma_{изг}$, так и $\sigma_{сж}$ (160 и 475 МПа) достигаются после температуры обжига 1200 °C. Фазовый состав после обжига при 1400 °C представлен в основном корундом и муллитом, незначительным количеством стеклофазы. ВКВС композиционного состава в системе спеченный глинозем BSA 96–ВДКС могут быть перспективны при производстве многих видов керамобетонов в системах $Al_2O_3-SiO_2$, $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ и $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ЯЧЕИСТЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

(✉)

E-mail: nikbardin@mail.ru

© К. т. н. **К. Г. Земляной**¹, **Д. Д. Коньков**², **Л. Ф. Муфтеева**¹, **Г. С. Гиренко**¹,
к. т. н. **И. А. Павлова**¹ (✉)

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», кафедра химической технологии керамики и огнеупоров, Екатеринбург, Россия

² ООО НПП «Керамические системы», Екатеринбург, Россия

Целью исследовательской работы является разработка технологии производства кордиеритовых ячеистых катализаторов, которые применяют для очистки отработанных газов перед их выбросом в атмосферу в выхлопной системе автомобилей. В качестве сырьевых материалов предложено применять основные глины и обогащенные каолины, тальк, глинозем российских месторождений. Ячеистый катализатор представляет собой выполненную в форме сот керамическую подложку, вставленную в металлический корпус и защищенную теплоизоляционными материалами. Мелкие ячейки прибора имеют специальное покрытие — рабочий состав в виде сплавов платины, родия и палладия, драгоценных металлов. Сотовая конструкция катализатора увеличивает площадь соприкосновения токсичных газов с их

нейтрализующей поверхностью. Остатки вредных веществ мгновенно догорают и не попадают в атмосферу. Катализатор позволяет уменьшить вредные топливные выбросы, снизить эксплуатационные затраты и увеличить мощность. Такие катализаторы в настоящее время в России не производят. Поставки осуществляют из таких стран, как Китай, Германия и т. д. В связи с этим существует некоторая необходимость производства катализаторов в условиях РФ. Керамические катализаторы должны обладать высокой термостойкостью. Изготавливают их из кордиеритовых масс. В настоящий момент рассчитаны и разработаны составы масс для производства катализаторов на основе отечественного сырья, подобраны режимы обжига. Получен керамический материал с содержанием кордиерита 70 %.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

КАРБОСИЛИКОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ IV-V ГРУПП

(✉)

E-mail: istomina-ei@yandex.ru

© К. х. н. **Е. И. Истомина** (✉), к. х. н. **П. В. Истомин**, к. т. н. **А. В. Надуткин**, к. г.-м. н. **В. Э. Грасс**,
И. М. Беляев

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

Потребность в материалах для жестких условий эксплуатации особенно заметно проявляется в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как авиационная и ракетная техника, энергетика, двигателестроение. Жесткие условия эксплуатации предполагают совместное действие высоких температур, агрессивных сред, ударных механических и термических воздействий. Материалы, способные длительно противостоять воздействию этих разрушающих факторов, должны удовлетворять целому комплексу требований, таких как высокие показатели прочности, трещиностойкости, усталостной прочности, термической стабильности и химической стойкости, сохраняющие свои значения в широком диапазоне температур и при термоциклировании. Круг

веществ-кандидатов, способных обеспечить достижение требуемого уровня эксплуатационных характеристик, весьма ограничен. В основном сюда входят тугоплавкие бескислородные соединения переходных металлов. Среди них особо следует отметить класс тройных соединений — МАХ-фазы, сложные карбиды и нитриды переходных металлов с общей формулой $M_{n+1}AX_n$, где символ M в формуле металл группы IVB (Ti, Zr, Hf) или группы VB (V, Nb, Ta); символ A — элемент группы IIIA (Al, Ga, In, Tl) или группы IVA (Si, Ge, Sn, Pb); символ X соответствует атому углерода или азота.

Одним из перспективных подходов к синтезу этих соединений является недавно разработанный нами метод карбосиликотермического восстановления оксида

титана с использованием карбида кремния в качестве восстановителя. Использование SiC позволяет объединить карбо- и силикотермические процессы при восстановлении оксидов переходных металлов. Важный аргумент в пользу этого подхода — широкая доступность и низкая стоимость оксидов по сравнению с бескислородными прекурсорами, традиционно используемыми для синтеза МАХ-фаз.

В работе представлены результаты карбосиликотермического восстановления переходных металлов IV–V групп. Восстановление проводили при 1600 °С в условиях непрерывной вакуумной откачки газообразных продуктов в лабораторном реакторе секционного

типа. Конструкция реактора позволяла регулировать истечение газообразных продуктов (CO и SiO) из реакционного объема, а также улавливать газ SiO, покидающий пределы реакционной зоны, путем его химического связывания с твердотельным поглотителем — активированным углем. Таким методом были получены образцы кремнийсодержащих МАХ-фаз разного состава, а также высокоэнтропийный карбид состава $(\text{Ti}_{0,20}\text{Zr}_{0,20}\text{Hf}_{0,20}\text{Nb}_{0,20}\text{Ta}_{0,20})\text{C}$.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-48-110001 p_a.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ И ЕГО УПРУГИЕ СВОЙСТВА

(✉)

E-mail: gulya-ka11@yandex.ru

© К. ф.-м. н. **Г. Д. Кардашова** (✉), к. ф.-м. н. **Е. Г. Пашук**, **Ш. А. Халилов**
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», кафедра инженерной физики, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

Карбидкремниевая керамика обладает высокими огнеупорностью и радиационной стойкостью и востребована там, где необходима достаточная прочность изделия при высоких температурах и устойчивость к радиации. Свойства керамики в значительной степени определяются составом разных наполнителей матрицы карбида кремния, межзеренной фазовой составляющей и пористостью. Все служебные свойства керамики, в том числе плотность и модули упругости, зависят от технологических параметров получения керамического материала. Задачи исследований — разработка технологии и получение керамики на основе SiC–AlN перспективным, но еще недостаточно отработанным методом искрового плазменного спекания и исследование упругих свойств образцов керамики.

Спекание смеси порошков состава SiC(75 %)–AlN(25 %) путем пропускания через заготовку электрического тока осуществлялось в цилиндрических пресс-формах внутренним диаметром 10 мм. Пресс-формы были изготовлены из изостатического графита И-3 с использованием дополнительного слоя графитовой бумаги между матрицей и порошковой засыпкой и между графитовыми пуансонами и порошком для устранения реакции между порошком и материалом оснастки. Параметры спекания: температура спекания 1800, 1900 и 2000 °С, давление прессования 50 МПа, атмосфера — вакуум, длительность спекания при рабочей температуре 12 и 15 мин, выход на режим до температуры спекания 100 °С/мин. Спекание проводи-

ли при приложении постоянного давления к порошку в течение всего времени, охлаждение образцов проходило свободно в камере.

Полученные образцы шлифовали для достижения допустимых отклонений от цилиндрической формы и шероховатости поверхностей. Истинную плотность определяли на гелиевом пикнометре Accu Pyc 1340 компании Micromeritics, кажущуюся плотность измеряли методом гидростатического взвешивания. Модули упругости C_{11} и C_{44} (EM) образцов измеряли при комнатной температуре методом резонансной ультразвуковой спектроскопии на модернизированной установке. EM находили путем сведения измеренного спектра откликов {fex} образца на гармоническое воздействие к спектру собственных частот образца {ft}, рассчитанному по известной геометрии и его упругим свойствам. По известным соотношениям теории упругости вычисляли модули сдвига ($G = C_{44}$), Юнга E , объемной сжимаемости B и коэффициент Пуассона μ .

Установлено, что зависимость E и G от пористости P хорошо описывается экспоненциальной функцией $EM = EMO \cdot \exp(-b \cdot P)$, где EMO — модуль упругости при нулевой пористости. Полученные значения EMO для образцов состава SiC + 25 % AlN: $G_0 = 153$ ГПа, $E_0 = 367$ ГПа. Параметр пористости b для E и G примерно одинаков и равен 3,67 и 3,57 соответственно. Коэффициент Пуассона практически не зависит от пористости и равен 0,185. Обсуждается возможность оценки однородности образцов по результатам измерения модулей упругости.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЙ ШАМОТ НА ОСНОВЕ
ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВЛЕННОГО КОРУНДА**(✉)
E-mail: htko@yandex.ru© Д. Т. Н. И. Д. Кашцев, А. А. Гетман, А. П. Обрубова, К. Т. Н. Е. П. Фарафонтонтова,
К. Т. Н. И. А. Павлова (✉)ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», институт новых материалов и технологий,
Екатеринбург, Россия

При дроблении плавленного корунда образуется высокодисперсный порошок с содержанием Al_2O_3 93–95 % в виде некондиционного материала. Утилизацию этого порошка целесообразно осуществлять для получения высокоглиноземистого шамота с содержанием Al_2O_3 более 62 %. Высокоглиноземистый наполнитель (шамот) получали по полусухой технологии с промежуточным формованием брикета из смеси корундового дисперсного порошка и обогащенного каолина. Зерновой состав дисперсного корундового порошка представлен частицами размерами менее 0,5 мм с преобладающим содержанием 50–55 % фракции 0,16–0,063 мм и 40–45 % мельче 0,063 мм. Шихтовый состав массы для получения высокоглиноземистого наполнителя (шамота) рассчитывали, исходя из конечного содержания Al_2O_3

65, 75 и 85 мас. %. Из смеси дисперсного корундового порошка и каолина, увлажненной до 5–9 % раствором ЛСТ плотностью 1,05 г/см³, под давлением 10–20 МПа прессовали брикеты и обжигали их при 1700 °С. Обожженные брикеты имели прочность от 93 до 193 МПа при содержании Al_2O_3 соответственно от 65 до 85 %, водопоглощение брикетов от 12 до 16 %.

Используемый обогащенный каолин с содержанием SiO_2 и Al_2O_3 соответственно 46–50 и 36–39 % (остальное примеси) не оказал спекающего действия на тонкодисперсный корунд. Для получения шамота водопоглощением менее 2 %, по всей вероятности, в состав шихты необходимо вводить компоненты, образующие жидкую фазу при указанной температуре обжига.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**НЕФОРМОВАННЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**(✉)
E-mail: anna.glyzina94@gmail.com

© Д. Т. Н. И. Д. Кашцев, А. Э. Глызина (✉), Н. Д. Ивачева

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», институт новых материалов и технологий,
Екатеринбург, Россия

За последние десятилетия одна из тенденций в технологии огнеупоров — рост производства и применения неформованных огнеупоров, таких, как набивные массы и смеси, мертели, покрытия, бетоны, торкрет-массы и др. Стремление снизить энергозатраты в производстве неизбежно связано с использованием теплоизоляционных материалов для футеровки тепловых агрегатов. Это направление получило развитие не только у металлургов, но и у производителей огнеупорных материалов.

Физико-химические и теплофизические свойства защитного покровного шлака в промежуточном агрегате должны быть нейтральными по отношению к разливаемому металлу и обеспечивать его защиту от вторичного окисления, минимизацию потерь тепла от зеркала металла, активное и длительное поглощение неметаллических включений разных размеров и происхождения, находящихся в ванне агрегата. При этом шлаковое покрытие не должно нарушать работу стопоров и должно быть инертным по отношению к рабочему слою футеровки ковша, а газовая среда над шлаком должна иметь минимальное количество вредных соединений.

Применение диатомита в качестве сырья для производства теплоизоляционных смесей является выгодным с технико-экономической точки зрения: запасы диатомита огромны и легкодоступны для добычи открытым способом, диатомит является хорошим природным теплоизолятором с нанопористой структурой. Однако диатомит имеет невысокую огнеупорность вследствие содержания в нем различных примесей. Путем корректирования со-

става и технологическими приемами можно добиться использования смесей на основе диатомита в качестве теплоизолирующего материала для утепления и защиты зеркала металла в ковше или в других тепловых агрегатах. Наиболее целесообразно с технико-экономических позиций использовать диатомит для изготовления теплоизолирующих смесей в производстве цветных металлов, в частности при разливе алюминия.

В данной работе использовали диатомит Ильинского месторождения (Свердловская обл.). По химическому составу этот материал имеет высокое содержание кремнезема (75,22 мас. %). По минеральному составу он представлен кварцем, монтмориллонитом, каолинитом и аморфной фазой. Аморфная часть представлена опаловой породой ($SiO_2 \cdot nH_2O$). Эффективность применения полученного теплоизоляционного материала оценивали при плавке технического алюминия в кварцевом стакане и чугунном тигле.

Установлено, что:

– теплоизоляция поверхности расплава алюминия в кварцевом тигле диатомитовой засыпкой способствует увеличению длительности кристаллизации и сохранению температуры алюминия в тигле от 10–11 до 40 мин;

– теплопроводность чугунного тигля способствует высокой скорости охлаждения расплава металла. Охлаждение алюминия без засыпки от температуры плавления алюминия до 615 °С происходит примерно за 20 мин;

– сокращение скорости охлаждения металла положительно влияет не только на технико-экономические показатели процесса, но и на качество металла. Так, быстрое охлаждение расплава может привести к измене-

нию структуры металла, что может вызвать отклонение от заданных свойств. Кроме того, с применением диатомитовой теплоизоляционной смеси сокращаются затраты на повторный разогрев металла при его разливе.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ И УЛЬТРАПОРИСТЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ВСПУЧИВАНИЯ

(✉)

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

Высокопористые огнеупорные материалы находят широкое применение в различных областях техники: в качестве высокотемпературной теплоизоляции в агрегатах цветной и черной металлургии, фильтров для высокотемпературных расплавов, фильтрующих элементов для очистки горячих газов, элементов конструкций для продувки расплавленных металлов инертными газами. Известны способы синтеза высокопористых керамических материалов с помощью выгорающих добавок, микропористых заполнителей природного или искусственного происхождения, полых микрогранул, а также методом подбора специального фракционного состава шихты или химического вспенивания предварительно подготовленного шликера.

В СПбГТИ (техническом университете) применяется технология синтеза высокопористых керамических материалов методом химического вспенивания и стабилизации (с последующим обжигом) керамического шликера, содержащего огнеупорный наполнитель, дисперсионную среду и комплексный органиче-

ский порообразователь. Разработанный комплексный органический порообразователь практически полностью выгорает в ходе высокотемпературного обжига и не загрязняет огнеупорный материал корундового, муллитокорундового, муллитового и муллитокремнеземистого составов. Предложенный комплексный органический порообразователь вводится в состав керамического шликера на водной основе, а вспучивание массы происходит в результате реакции газобразования при 100–120 °С. Этот процесс сопровождается увеличением объема шликера в 2,5–3,0 раза; при этом происходят стабилизация и затвердевание образовавшейся мелкопористой керамической массы. Окончательное упрочнение и придание финальных свойств материалу достигается при высокотемпературном обжиге (1250–1500 °С). В результате удается получить огнеупорный ультрапористый материал с пониженным содержанием примесей, открытой пористостью до 80 % и пределом прочности при изгибе до 5,0 МПа.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

(✉)

E-mail: chemic@yandex.ru

© К. т. н. **В. В. Козлов** (✉), **А. В. Иванов**

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

В условиях возросших требований к огнеупорным материалам ответственного назначения, предназначенным для эксплуатации в футеровке металлургических агрегатов, при стабильно повышающихся ценах на высококачественные огнеупорные материалы актуальными задачами являются снижение расхода огнеупоров на тонну выплавляемой стали и повышение ресурса футеровки.

На кафедре химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов СПбГТИ (ТУ) разработан программный комплекс, предназначенный для оптимизации химического и фазового составов сталеплавильных шлаков в рамках многокомпонентных оксидных систем $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Программный комплекс может применяться для оценки равновесного фазового состава и температуры ликвидуса сталеплавильных

шлаков, для определения областей первичной кристаллизации и степени насыщения расплавов огнеупорными фазами (MgO , $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, Al_2O_3).

Концентрация насыщения огнеупорной фазой шлакового расплава является ключевым параметром, определяющим агрессивность шлака по отношению к футеровке. Этот параметр зависит от химического состава и температуры шлакового расплава. Степень ненасыщенности расплава по MgO (как разница между концентрацией насыщения оксидом магния и его реальным содержанием) играет роль численного параметра агрессивности шлакового расплава по отношению к периклазоуглеродистой футеровке. Степень ненасыщенности расплава огнеупорной фазой подвергается моделированию (в том числе с помощью предложенного программного решения) и регулированию в рамках оптимизации шлакового режима металлургической

плавки для повышения ресурса футеровки и снижения доли огнеупоров в себестоимости металла.

В ходе экспериментальных исследований подтверждена корректность работы предлагаемого программного комплекса при прогнозировании равновес-

ного фазового состава огнеупорных и шлаковых систем. Возможно применение комплекса при расчете модификации или дошихтовки сталеплавильных металлургических шлаков для получения фаз, обладающих вяжущими свойствами.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЫСОКОАЛЮМИНАТНЫЕ НИЗКОЦЕМЕНТНЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

(✉)
E-mail: 55pen@mail.ru

© Д. т. н. **Ю. Р. Кривобородов**¹, д. т. н. **Е. Н. Потапова**¹(✉), **Е. А. Дмитриева**¹,
к. т. н. **И. Ю. Бурлов**²

¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»,
кафедра химической технологии композиционных и вяжущих материалов, Москва, Россия

² АО «Подольск-Цемент», г. Подольск, Россия

Одним из путей снижения материалоемкости продукции и экономии сырьевых ресурсов является вовлечение в производство вторичных материальных ресурсов — отходов, которые образуются как в сфере материального производства, так и в сфере потребления. Принцип переработки вторичных ресурсов сформулировал академик И. П. Бардин: «Отходы одних технологических переделов или производств должны служить сырьем для других». Интенсивный расход материальных и энергетических ресурсов обуславливает высокий уровень образования отходов в металлургической отрасли при производстве кокса и агломерата, выплавки чугуна и стали, производства проката. На предприятии «Тулачермет-Сталь» техногенным отходом является высокоалюминатный бетон сталеразливочных ковшей, отслуживший свой срок, который не перерабатывается и накапливается в хранилище. Исследования, проведенные совместно специалистами АО «Подольск-Цемент» и научными сотрудниками РХТУ им. Д. И. Менделеева, позволили на основе этого техногенного материала

разработать технологию высокоалюминатных низкоцементных огнеупорных бетонов. Результаты проведенных физико-химических анализов (РФА, ДТА, электронной микроскопии, петрографии) позволили установить фазовый состав и структуру техногенного материала, подобрать необходимые параметры его обработки и после сортировки, дробления, дозирования, обжига и измельчения получить высокоалюминатный цемент ВГЦ-II по ГОСТ 969–91. Подбор гранулометрического состава заполнителей и химических добавок, вводимых в готовую бетонную смесь, позволил получить ее стабильные реологические свойства и высокие прочностные показатели затвердевшего бетона. Предел прочности при сжатии бетона после термообработки при 110 °С и 24-ч выдержки более 60 МПа, а при 1500 °С и 3-ч выдержки — более 80 МПа; при этом линейная усадка составляла (0,4+0,1) %. Разработаны составы сухих бетонных смесей для проведения футеровочных работ на металлургических агрегатах: сталеразливочных ковшей, желобов розлива стали на прокатный стан.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОАЛЮМИНАТНЫХ НИЗКОЦЕМЕНТНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ООО «ТУЛАЧЕРМЕТ-СТАЛЬ»

(✉)
E-mail: nikbardin@mail.ru

© Д. т. н. **Ю. Р. Кривобородов**¹(✉), д. т. н. **Е. Н. Потапова**¹, **Е. А. Дмитриева**¹,
к. т. н. **И. Ю. Бурлов**²

¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»,
кафедра химической технологии композиционных и вяжущих материалов, Москва, Россия

² АО «Подольск-Цемент», г. Подольск, Россия

Современные металлургические предприятия имеют высокие экологические стандарты технологических процессов. Но в процессе металлургического производства образуются техногенные отходы с различным химико-минеральным составом, которые требуется максимально вовлечь во вторичное использование. Полноценное решение вопроса вторичного использования техногенных отходов предприятия «Тулачермет-Сталь» — разработка наилучших доступных технологий для каждого вида отхода. В перечень техногенных отходов металлургического производства входит огнеупорный высокоалюминатный бетон сталеразливочных ковшей, отслуживший свой срок. На временном складе пред-

приятия происходит накопление отработанного бетона для его дальнейшей переработки.

Результаты исследований отработанного бетона выявили качественные показатели, которые обозначают направление его использования. По данным рентгенофазового анализа минеральный состав представлен двумя фазами — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в соотношении 6:1, примесями в виде твердых растворов Ca_6 , соединениями SiO_2 и Al_2O_3 , MgO , кварцем. Материал белого цвета, состоит из крупных кусков размерами до 300 мм с присутствием мелкой и пылевидной фракций с серыми и темными включениями металлургического шлака, а также редкими металлическими включениями.

Разработана технология получения огнеупорного высокоалюминатного низкоцементного бетона с использованием техногенного материала — отработанного бетона, который проходит стадии сортировки, дробления, дозирования, обжига, измельчения, смешения сухой бетонной смеси, упаковки. Производство включает высокотемпературный синтез высокоалюминатного цемента ВГЦ-II по ГОСТ 969–91 и корундового наполнителя заданного гранулометрического состава. Подобраны химические добавки в готовую сухую бетонную смесь для получения стабильных прочностных и реологических свойств бетонного раствора. Конечным продуктом является сухая бетонная смесь для

проведения футеровочных работ на металлургических агрегатах: сталеразливочных ковшах, желобах розлива стали. Параметры разработанного бетона ВНОБ-90 представлены ниже:

Содержание, %:	
Al ₂ O ₃	≥ 90,0
CaO.....	≤ 3,0
σ _{сж} , МПа, после термообработки (и выдержки):	
110 °С (24 ч).....	≥60,0
1500 °С (3 ч).....	≥80,0
Линейная усадка, %:	
110 °С (24 ч).....	0,3
1500 °С (3 ч).....	0,5

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЛОЖНЫХ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ ОКСИДОВ $Bi_{5-x}Ca_xFeTi_3O_{15-6}$

(✉)
E-mail: natus@mail.ioffe.ru

© Н. А. Ломанова (✉)

ФГБН «Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе», лаборатория новых неорганических материалов, Санкт-Петербург, Россия

В системе Bi_2O_3 – CaO – Fe_2O_3 – TiO_2 реализуются слоистые перовскитоподобные оксиды типа фаз Ауривиллиуса $A_{m-1}Bi_2Fe_{m-3}Ti_3O_{3m+3}$ (A — Bi , Ca) с различным числом слоев m в перовскитоподобном блоке. В гомологическом ряду $A_{m-1}Bi_2Fe_{m-3}Ti_3O_{3m+3}$ четырехслойное соединение $Bi_5FeTi_3O_{15}$ ($m = 4$) обладает наиболее высокими температурами перитектического разложения ($T_{dec} = 1100$ °С), фазового перехода II (точка Кюри, $T_c = 740$ °С) и структурной устойчивостью. Материалы на основе $Bi_5FeTi_3O_{15}$ перспективны как высокотемпературные мультиферроики. Твердые растворы $Bi_{5-x}Ca_xFeTi_3O_{15-6}$, номинальный состав которых соответствовал $x = 0,1 \div 0,9$, синтезированы методом твердофазных химических реакций из простых оксидов висмута, кальция, железа и титана. Характеризация образцов выполнена методами рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии, элементного энергодисперсионного микроанализа,

мессбауэровской спектроскопии, комплексного термического анализа (ДСК/ТГ) и дилатометрии. Определено, что при изоморфном замещении иона Bi^{3+} ионом большего радиуса ($r(Bi^{3+}) (VIII) = 1,25$ Å, $r(Ca^{2+}) (VIII) = 1,26$ Å) материалы с наибольшим выходом целевого продукта получены при $x \leq 0,4$. Ионы железа во всех образцах имеют состояние Fe^{3+} . При $x > 0,4$ формирование однофазных материалов затруднено в связи с появлением в реакционной системе примесных фаз разных структурных типов. Установлено, что образование $Bi_{5-x}Ca_xFeTi_3O_{15-6}$ ($x \leq 0,4$) начинается при температуре около 700 °С, соответствующей плавлению объемной фазы на основе оксида висмута. При 900 °С происходит формирование однофазных материалов. Результат ДСК/ТГ показал, что изоморфное замещение ионов висмута на кальций увеличивает значения T_{dec} и T_c фаз Ауривиллиуса на 20–30 °С, а ТКЛР снижается незначительно.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЫСОКООГНЕУПОРНАЯ ОСОБОПЛОТНАЯ КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА, ПОЛУЧЕННАЯ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ФОРМОВАНИЯ

(✉)
E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

© К. Т. н. В. В. Мартыненко, к. т. н. К. И. Кущенко (✉), к. т. н. Ю. А. Крахмаль, к. т. н. Ю. Е. Мишнева

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

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана и внедрена технология высокоогнеупорной особоплотной корундовой керамики марки КОП. Изделия из корундовой керамики изготавливают различными методами формования: шликерным литьем, экструзией и термопластическим формованием. Значительное место среди методов формования занимает шликерное литье в гипсовые формы. В зависимости от толщины стенки и конфигурации изделия применяют два способа шликерного литья: сливным и наливным. Сливным способом отливают полые изделия в виде тиглей, чехлов, труб, кювет, лодочек и других с толщиной стенки 1–3 мм, наливным способом — изделия сложной конфигурации, изоляторы, стержни,

пластины, ступки и пестики, а также изделия с толщиной стенки 4 мм и более. Установлена целесообразность применения в технологии корундовой керамики методом шликерного литья водных глиноземистых шликеров с диспергирующей добавкой в комбинации с упрочняющей добавкой в оптимальных количествах для изготовления изделий сливным способом, а также только с диспергирующей добавкой в оптимальном количестве для изготовления изделий наливным способом.

Весьма распространенными методами формования изделий из корундовой керамики в виде стержней, бус, капиллярных трубок с одним или несколькими каналами являются также экструзия и термопластическое формо-

вание, сущность которых заключается в выдавливании массы через мундштук, определяющий форму и поперечный размер изделия, либо инъекция с использованием термопластичных масс. Достоинства методов экструзии и термопластического формования — высокая производительность, а также возможность получения полых изделий различных формы и длины. Показана целесообразность использования глиноземистых масс на временной технологической связке с заданной влажностью в технологии корундовой керамики, полученной методом экструзии, а также определены оптимальные

соотношения твердой фазы и временной технологической связки, температура и давление формования в технологии корундовой керамики, полученной методом термопластического формования.

В результате проведенных исследований усовершенствована и доработана технология получения высокоогнеупорной особоплотной корундовой керамики с высокими показателями свойств: массовой долей Al_2O_3 не менее 99,5 %, Fe_2O_3 не более 0,05 %, SiO_2 не более 0,1 %, MgO не более 0,1 %, а также открытой пористостью 0.

КОРУНДОХРОМОКСИДЦИРКОНИЙСИЛИКАТНЫЕ ОГНЕУПОРЫ, СОДЕРЖАЩИЕ 60 % Cr_2O_3 , С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К РАСПЛАВАМ СТЕКЛА Е И БАЗАЛЬТА ДЛЯ ПЕЧЕЙ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОВОЛОКНА

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, к. т. н. **П. А. Кущенко**, 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

Высокоогнеупорные изделия, используемые для футеровки бассейна, фидера и верхнего строения стекловаренных печей производства стекловолокна из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла Е и базальта, в процессе эксплуатации подвергаются длительному коррозионному и эрозионному воздействию компонентов шихты и агрессивных стекольных и базальтовых расплавов, паров и газов при 1550–1700 °С. Для службы в стекловаренных печах производства стекловолокна в АО «Украинский научно-исследовательский институт огнеупоров имени А. С. Бережного» разработаны и изготавливаются хромоксидные, корундохромоксидцирконийсиликатные и корундохромоксидцирконийсиликатные огнеупоры (с 10, 15 и 30 % Cr_2O_3), обеспечивающие непрерывную кампанию печей в течение 7–7,5 лет. Эти огнеупоры на протяжении ряда лет поставлялись на предприятия, производящие стекловолокно, в Украине, Республике Беларусь, Латвии, Российской Федерации.

В УкрНИИО имени А. С. Бережного разработана технология корундохромоксидцирконийсиликатных огнеупоров с содержанием Cr_2O_3 60 %, обладающих повышенной коррозионной стойкостью к расплавам стекла Е и базальта. Огнеупоры предназначены для

футеровки участков верхнего строения печей производства стекловолокна, испытывающих интенсивное воздействие компонентов стекольной шихты и стекломассы. Исследовано влияние зернового состава и соотношения компонентов шихты, а также атмосферы при обжиге на структуру и свойства прессованных корундохромоксидцирконийсиликатных огнеупоров с содержанием Cr_2O_3 60 %. Установлен оптимальный состав шихты, обеспечивающий после обжига в окислительной атмосфере получение огнеупоров с высокими показателями свойств.

Проведены сопоставительные исследования коррозионной стойкости разработанных корундохромоксидцирконийсиликатных огнеупоров с содержанием Cr_2O_3 60 % и огнеупора марки КХЦС 30 с содержанием Cr_2O_3 30 % к расплавам стекла Е и базальта тигельным методом при 1580 °С с выдержкой 8 ч. Показано, что образцы разработанного состава в меньшей степени подвергаются коррозии этими расплавами, чем образцы огнеупора марки КХЦС 30. Установлен механизм коррозии корундохромоксидцирконийсиликатных огнеупоров расплавами стекла Е и базальта, а также механизм сопротивления этих огнеупоров развитию коррозии.

ВЫСОКООГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДОМ ИТТРИЯ, ДЛЯ УСТАНОВОК ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, к. т. н. **П. А. Кущенко**, к. т. н. **И. Г. Шулик**, к. т. н. **Т. Г. Гальченко** (✉), **Е. Б. Процак**

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

При выборе эффективных огнеупоров, применяемых в футеровке высокотемпературных агрегатов и установок, исходят из специфики агрессивного воздействия разрушающих факторов, в первую очередь темпе-

ратуры и состава газовой среды. К огнеупорным материалам, применяемым в установках выращивания монокристаллов, предъявляется ряд специальных требований: в частности, они должны обладать высокой

стабильностью свойств в области низких и высоких температур (вплоть до 2300–2400 °С) и устойчивостью к сублимации, поскольку выращивание монокристаллов осуществляется в установках с контролируемой газовой средой. При выращивании монокристаллов наряду с другими факторами особое внимание уделяют чистоте газовой атмосферы, так как привнесение малейших посторонних примесей в газовую среду установки приводит к ухудшению качества выращиваемого монокристалла и, в первую очередь, его светотехнических характеристик.

Существенным преимуществом огнеупоров из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 , по сравнению с огнеупорами из ZrO_2 , стабилизированного CaO , MgO и др., является наряду с их высокой огнеупорностью и низкой теплопроводностью, мало изменяющейся с ростом температуры, высокая устойчивость к сублимации: вследствие близости скоростей испарения Y_2O_3 и ZrO_2 существенного изменения в составе материала вплоть до 2500 °С не обнаружено. Кроме того, кубические твердые растворы Y_2O_3 в ZrO_2 обладают наибольшей стабильностью

свойств в области низких и высоких температур из-за того, что размер примесного катиона на 10–20 % больше иона Zr^{4+} , а заряд меньше (Y^{3+}).

Исходя из вышеизложенного, в АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработана технология и производятся изделия высшей огнеупорности из ZrO_2 , стабилизированного 8–11 % Y_2O_3 (марки ЦИС-1Т) и 22–25 % Y_2O_3 (марки ЦИС-2), в виде крышки, цилиндра, тигля без замкового соединения, а также кольца, диска, сектора с замковым соединением разных типоразмеров (по ТУ У 23.2-00190503-405:2015), предназначенные для установок выращивания монокристаллов. Изделия характеризуются высокими показателями свойств: массовой долей ($ZrO_2 + HfO_2$) 87,0–91,0 и 73,0–77,0, Y_2O_3 8,0–11,0 и 22,0–25,0, Fe_2O_3 не более 0,3, открытой пористостью не более 25 %, пределом прочности при сжатии не менее 35 и 45 МПа соответственно для изделий марок ЦИС-1Т и ЦИС-2. Изделия успешно эксплуатируются в промышленных высокотемпературных установках выращивания монокристаллов, обеспечивая с высоким качеством требуемые параметры технологического процесса.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

КОРУНДОШПИНЕЛЬНЫЕ ПРОБКИ ДЛЯ ДОННОЙ ПРОДУВКИ СТАЛИ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШАХ

(✉)

© К. т. н. **В. В. Мартыненко**, к. т. н. **П. А. Кущенко**, к. т. н. **И. Г. Шулик**, **Л. Н. Золотухина** (✉)

E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

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

В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» разработаны и успешно применяются на металлургических предприятиях Украины донные продувочные пробки с использованием плавеных корунда и алюмомагнезиальной шпинели. Для дальнейшего совершенствования технологии изготовления корундошпинельных пробок исследовали основные показатели свойств, химический и фазовый составы, структуру изготовленной плавеной алюмомагнезиальнохромитовой шпинели и ранее используемой алюмомагнезиальной, а также влияние вида шпинели на основные показатели свойств вибролитых образцов после обжига при 1580 °С. Показано, что замена в составе образцов алюмомагнезиальной шпинели на алюмомагнезиальнохромитовую установленного оптимального зернового состава обеспечивает получение образцов с показателями свойств, сопоставимыми по открытой пористости (17,2 и 16,9 %), и повышенными значениями предела прочности при сжатии (123 МПа против 227). Для оценки работоспособности разработанных

огнеупоров в службе определена их коррозионная стойкость к воздействию шлака и расплавленной стали и показано, что замена в составе огнеупоров алюмомагнезиальной шпинели на алюмомагнезиальнохромитовую обеспечивает значительное увеличение их коррозионной стойкости к воздействию расплавленной стали марки Х12МФ (площади пропитки 1230 и 425 мм²) при близких значениях шлакоустойчивости (площади пропитки образцов шлаком 18 и 16 мм² соответственно).

В результате проведенных исследований разработан новый вид продукции и усовершенствована технология изготовления корундошпинельных пробок, содержащих алюмомагнезиальнохромитовую шпинель, которая обеспечивает получение огнеупоров с улучшенными показателями свойств. Это позволяет прогнозировать более высокую стойкость в службе пробок нового состава, содержащих алюмомагнезиальнохромитовую шпинель.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ✉
amigashkin@magnezit.com**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ТРЕЩИНЫ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШАХ
КАК ФАКТОР ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ.
УСПЕШНО РЕАЛИЗОВАННЫЕ РЕШЕНИЯ**© А. О. Мигашкин¹ ✉, К. Т. Н. Т. В. Ярушина¹, К. Т. Н. М. Ю. Турчин¹, К. Т. Н. А. В. Заболотский²¹ ООО «Группа Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия² ООО «Группа Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

В сталелитейной промышленности постоянно ведется процесс оптимизации, направленный на повышение производительности и рентабельности производства. Поэтому к условиям эксплуатации сталеразливочных ковшей предъявляются все более жесткие требования. Это относится как к высокопроизводительным периодам, когда необходимо быстро провести первоначальный прогрев ковша, так и к периодам с низкой производительностью, характеризующимся длительными простоями, когда необходимы также быстрые процедуры прогрева ковша. Чередующиеся циклические нагрузки, связанные с охлаждением футеровки и последующим нагревом при выпуске металла в ковш, а также различие термического расширения периклазоуглеродистых (ПУ) изделий и металла способствуют возникновению значительных термических напряжений. В результате футеровка ковшей подвергается преждевременному износу, связанному с образованием вертикальных трещин или раскрытием швов.

Причиной появления вертикальных трещин являются термические (температурные) напряжения, возникающие при резком нагревании, охлаждении футеровки, особенно в условиях инверсии теплового потока (нагрев-охлаждение-нагрев). При нагреве футеровки происходит расширение рабочей грани изделий; максимальные напряжения при этом локализуются на рабочей поверхности у вертикальных швов. Быстрый нагрев футеровки с учетом напряжений при сжатии горячей поверхности в круговом направлении вызывает необратимую деформацию материала на рабочей поверхности. Последующее расширение изделий на некотором расстоянии от горячей поверхности может провоцировать раскрытие шва. При охлаждении сравнительно быстро наступает момент, после которого температура в глубоких слоях изделия оказывается выше, чем на поверхности. При этом поверхность испытывает растягивающие напряжения (максимальные в ее центральной зоне), а на боковых гранях происходит изгиб. Когда растяги-

вающее напряжение чрезвычайно велико, появляются вертикальные трещины, которые разделяют изделия в вертикальном направлении.

Проведен анализ изменения температуры футеровки в межплавочный простой при охлаждении сталеразливочного ковша. Следует отметить, что в первые 3 мин происходит максимально быстрое охлаждение. Через 3 мин максимум температуры составляет чуть выше 1200 °С, минимум — 980 °С (при начальной 1600 °С). Через 30 мин простоя минимум температуры стен составляет 650 °С. Зачастую в начале кампании сталеразливочного ковша трещины не видны, но становятся хорошо заметны в процессе эксплуатации ковша вследствие сопутствующего коррозионно-эрозийного износа.

На ряде металлургических предприятий России успешно реализованы проекты, направленные на снижение вероятности появления вертикальных трещин. Испытаны несколько вариантов огнеупоров ПУ-состава. Один из них — модифицированный ПУ-огнеупор с добавкой плотноспеченного периклазового клинкера собственного производства, характеризующийся пониженными теплопроводностью и ТКЛР. Известно, что высокий ТКЛР огнеупоров ограничивает срок службы футеровки при довольно большой ее остаточной толщине вследствие вертикального растрескивания при термоциклировании. Еще одним эффективным приемом снижения ТКЛР является введение в состав ПУ-изделий корунда, так как в процессе службы футеровки он преобразуется в алюмомагнезимальную шпинель, что сопровождается необратимым расширением огнеупора. Шпинелеобразующие углеродсодержащие огнеупоры Группы «Магнезит» успешно эксплуатируются на ряде металлургических предприятий.

Специалистами Группы «Магнезит» продолжают исследовательские работы по изучению трещинообразования. Разработаны рекомендации, направленные на снижение вероятности появления вертикальных трещин.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ✉
E-mail: anna.glyzina94@gmail.com**ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ДИАТОМИТА ИЛЬИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

© К. Т. Н. И. А. Павлова, А. Э. Глызина ✉, Н. Д. Ивачева, Н. И. Савенков

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

В настоящее время в производстве строительных керамических изделий сосредоточено внимание на совершенствовании технологии, улучшении качества выпускаемой продукции и расширении ассортимента. Диатомитовые строительные изделия в сравнении с

глиняными имеют ряд преимуществ: таких как легкий вес и малая звуко- и теплопроводность. Диатомиты характеризуются как низкодисперсные, с содержанием глинистых частиц размерами менее 0,001 мм 15–39,1 %, среднепластичные с низким и средним содержанием

крупнозернистых включений, с преобладанием мелких и средних включений. Запасы диатомита на территории Урала огромны и легко доступны для добычи открытым способом. Диатомиты могут использоваться в качестве минеральной добавки при производстве сухих строительных смесей. Опал-кristобалитовые породы Урала могут быть сырьем многоцелевого назначения: для производства теплоизоляционных и строительных материалов (кирпич, скорлупа, ячеистое стекло), наполнителей, химических сорбентов, лакокрасочных покрытий и огнеупорных красок, а также для осветления нефтепродуктов. В связи с этим актуальными задачами являются исследование возможности применения диатомита Ильинского месторождения в производстве керамических изделий, а также разработка технологии их производства.

Диатомит Ильинского месторождения представлен основным компонентом — аморфным SiO_2 (70–77 мас. %), глинистым минералом — монтморилонитовой железистой глиной (9–14 мас. %) и кварцевым песком (3–4 мас. %). Карьерная влажность диатомита 41,1–42,7 %. С экономической точки зрения в технологии производства диато-

митовых изделий необходимо проводить сушку диатомита до влажности, которая будет обеспечивать высокую прочность сырца с наименьшими затратами на сушку, а формование при давлении, обеспечивающем высокую прочность. Таким образом, рекомендуемое давление прессования 10 МПа, влажность 20 %.

Для определения температуры обжига изделий из диатомита для получения прочного кирпича были изготовлены образцы при влажности 20 % и давлении прессования 10 МПа. Образцы обжигали в интервале 900–1050 °С с шагом 50 °С. Прочность образцов с повышением температуры обжига увеличивается до 50 МПа, водопоглощение снижается до 11 %, средняя плотность при обжиге в интервале 900–950 °С составляет 1,20 г/см³; при дальнейшем повышении температуры обжига до 1000 °С она снижается до 1,09 г/см³. Таким образом, в лабораторных условиях получены образцы диатомитового изделия марок от М150 до М400 класса средней плотности 1,2, относящиеся по тепло-техническим характеристикам к группе эффективных изделий с теплопроводностью кладки в сухом состоянии от 0,24 до 0,36 Вт/(м·°С).

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: nikbardin@mail.ru

ШЛАКОУСТОЙЧИВОСТЬ КЕРАМОБЕТОННЫХ ЖЕЛОБНЫХ МАСС СИСТЕМЫ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

© Д. Г.-М. Н. В. А. Перепелицын¹(✉), Л. В. Остряков¹, И. В. Острякова¹, д. т. н. Ю. Е. Пивинский²

¹ ОАО «Первоуральский динасовый завод», г. Первоуральск, Россия

² ООО НВП «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты исследований фазово-структурных превращений модифицированных огнеупорных бетонов системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ после испытаний на шлакоустойчивость к доменному шлаку НЛМК.

Минеральной основой заполнителя в бетоне были высокоглиноземистый (корундомуллитовый) шамот и карбид кремния $\alpha\text{-SiC}$ в соотношении шамот:SiC = 2,5:1,0. В качестве связующей (матричной) составляющей использовали комплексную высококонцентрированную вяжущую суспензию (ВКВС) системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с содержанием Al_2O_3 более 70 мас. %. Углеродистый материал был представлен высокотемпературным пеком и коксом. Испытания проводили традиционным тигельным методом, но в восстановительной газовой среде (коксовая засыпка) при температуре 1390 °С в течение 18 ч в промышленной туннельной печи для обжига динаса. После испытаний был сделан визуальный осмотр вертикального разреза тиглей, который показал полное отсутствие в них макрокоррозии (нет увеличения диаметра) и макропротитки (резкая граница огнеупора со шлаком, сохранение объема шлакового расплава). Это свидетельствует о достаточно высокой шлакоустойчивости керамобетона в данных условиях испытания.

Для получения дополнительной информации проведены петрографические исследования полированных образцов (аншлифов) из контактных зон огнеупор-шлак по высоте тиглей на оптическом микроскопе

Olympus BX41M-LED (1000-кратное увеличение). Установлены незначительная пропитка (0,5–1,5 мм) и тонкий локальный слой массообменного взаимодействия исключительно в контактном слое. С применением методологии структурно-генетического анализа установлены фазово-структурные микроизменения главных минералов огнеупорного тигля и шлака. Превращения обусловлены синергетическим взаимодействием кислотно-основного химического взаимодействия огнеупора («основание») со шлаковым расплавом («кислота», так как в шлаке $\text{CaO/SiO}_2 \approx 1,0$) и карботермического восстановления (прямого — углеродом С, косвенного — СО). В этом случае амфотерный корунд являлся основанием.

Продуктами кислотно-основного взаимодействия со стороны шлакового расплава являются шпинель MgAl_2O_4 и бонит $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, а со стороны керамобетона — стеклофаза с повышенным содержанием SiO_2 , геленит $2\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SiO}_2$, анортит $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ и бонит. Все примесные оксиды железа, содержащиеся в огнеупоре (контактный микрослой) и шлаке, восстановлены до металла и в виде капель Fe и FeSi погружены на дно тиглей.

Главные минералы керамобетона, представленные корундом и муллитом, воздействию восстановительной газовой среды и твердого углерода не подверглись. Детальным структурно-генетическим

анализом вторичных образований — псевдоморфоз и реликтов (остатков) первичных неизменных кристаллов — выявлено несколько стадий изменения карбида кремния под воздействием остаточного кислорода (в порах тигля и коксовой засыпки), твердого углерода С и монооксида СО:

Результат реакции

- SiC + 1,5O₂ → SiO₂ + CO↑ (1) Газовый «барьер» СО
 SiC + O₂ → SiO₂ + C (2) Нанопокрытие пор углеродом
 SiC + O₂ → SiO↑ + CO↑ (3) Газовый «барьер» СО
 SiC + 2CO → SiO₂ + 3C (4) Нанопокрытие пор углеродом
 SiO + C → Si + CO↑ (5) Газовый «барьер» СО.

Новообразованный сажистый углерод, получаемый из карбида кремния по реакциям (2) и (4), осажден в

виде нанопленочного покрытия на поверхности открытых и закрытых пор, что препятствовало смачиванию бетона шлаковым расплавом и его капиллярной пропитке внутрь огнеупора. Совместное положительное влияние вторичного кремнезема SiO₂, образующегося по реакциям (1), (2) и (4), и газовый «барьер» по реакциям (1), (3) и (5) совместно с сажистым (вторичным) углеродом по реакциям (2) и (4) обеспечили достаточно высокую макроскопическую шлакоустойчивость керамобетона.

На основании данного петрологического заключения можно прогнозировать повышенную износоустойчивость керамобетона в футеровке желобов доменного производства.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ МУЛЛИТОКОРУНДОВЫХ ОГНЕУПОРОВ

✉
E-mail: ukmiio@kharkov.ukrtel.net

© Д. Т. Н. В. В. Примаченко, к. т. н. В. В. Мартыненко, к. т. н. И. Г. Шулик, 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 муллитокорундовых огнеупоров различных марок, в том числе тиглей для плавки жаропрочных сплавов. Технология предполагает использование в составе шихты заполнителя и технологической связки. В качестве заполнителя применяют плавленные порошки корунда и муллита полифракционного состава, взятые в оптимальном количестве каждой фракции, в качестве тонкодисперсной технологической связки — глинозем оптимальной дисперсности, существенно влияющий на литейные характеристики массы и, как следствие, на свойства готовой продукции.

Для совершенствования технологии вибролитых муллитокорундовых огнеупоров, а также поиска новых альтернативных сырьевых материалов исследовали применение новых видов глинозема, влияние длительности помола глинозема на его дисперсность для уста-

новления оптимальных технологических параметров измельчения, а также влияние дисперсности глинозема на растекаемость при вибрации муллитокорундовой массы для установления ее оптимальной влажности. При изучении структурно-механических свойств вибролитой муллитокорундовой массы установлено, что все исследуемые массы имеют подобный механизм структурообразования, а также характеризуются низким значением пластической прочности. Это свидетельствует об их пригодности к использованию в технологии вибролитья муллитокорундовых огнеупоров даже после 24 ч хранения. Установлено, что вибролитые муллитокорундовые огнеупоры, изготовленные с применением новых видов глинозема, характеризуются высокими показателями свойств: содержанием Al₂O₃ 90–93 мас. %, Fe₂O₃ 0,1–0,2 мас. %, открытой пористостью 15–17 %, пределом прочности при сжатии 150–180 МПа.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА TiV/TiAl/Ti–6Al–4V, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СВОБОДНОГО СВС-СЖАТИЯ

✉
E-mail: arina@ism.ac.ru

© А. Д. Прокопец (✉), к. т. н. А. П. Чижиков, А. С. Константинов, д. т. н. П. М. Бажин, д. ф.-м. н. А. М. Столин
 ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мерджанова Российской академии наук» (ИСМАН), г. Черноголовка, Россия

В последние годы с развитием современных передовых технологий интерметаллиды TiAl нашли применение в качестве высокотемпературных материалов в аэрокосмической и автомобильной промышленности из-за низкой плотности, высокой удельной прочности и относительно хорошей стойкости к окислению при температуре окружающей среды. Тем не менее, хрупкость и износоустойчивость являются основными ограничениями для их применения. Поэтому большой интерес вызыва-

ют стратегии улучшения свойств TiAl для практического применения. Создание композитов с чередующимися слоями TiAl и TiV является эффективным способом повышения износоустойчивости и твердости монолитных интерметаллидов TiAl. Такие композиционные материалы являются многообещающими благодаря уникальному сочетанию высокой твердости, низкой плотности и высокому модулю упругости, а также хорошей химической и термической стабильности. Многослойные композиты

TiB–TiAl получают горячим прессованием, прокаткой заготовок в валках, сваркой взрывом и др. Перспективно для получения слоистых композиционных материалов сочетание процессов СВС и последующего сдвигового высокотемпературного деформирования продуктов синтеза. Это сочетание реализовано в методе свободного СВС-сжатия, который позволяет в одну технологическую стадию за десятки секунд получать слоистые композиционные материалы.

Цель настоящей работы — получение методом свободного СВС-сжатия слоистого композиционного материала TiB/TiAl/Ti–6Al–4V, изучение особенностей его строения, а также измерение твердости. Установлено, что слоистый композиционный материал состоит из трех основных слоев, соответствующих разным фазовым и структурным составляющим. Первый слой (верх-

ний) состоит из моноборида титана TiB, расположенного в титановой матрице. В нижерасположенном слое (второй слой) наблюдаются основная интерметаллидная фаза TiAl и Ti₃Al. Третий слой представляет собой титановую подложку Ti–6Al–4V. Показатели твердости (1081 HV) и микротвердости (14,13 ГПа) на поверхности полученного композиционного материала выше, чем у монолитного материала TiAl (твердость 460 HV, микротвердость 5,95 ГПа).

Таким образом, в работе была показана возможность образования слоистого композита на основе TiB и TiAl на титановом сплаве Ti–6Al–4V. Показано образование слоистого композита TiB/TiAl/Ti–6Al–4V за счет сочетания процессов горения и сдвигового высокотемпературного деформирования, реализуемого в условиях свободного СВС-сжатия.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЛИЯНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОЙ АТМОСФЕРЫ НА СИНТЕЗ КАРБИДА ГАФНИЯ

✉

E-mail: festurvp@mail.ru

© 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 (HfC) интенсивно исследуется для применения при сверхвысоких температурах благодаря его высокой температуре плавления, фазовой стабильности, а также хорошим термомеханическим и термохимическим свойствам. Карбид гафния является перспективным материалом для производства огнеупорных, жаропрочных и абразивных материалов, твердых сплавов с улучшенными прочностными характеристиками, а также в качестве легирующего материала для дисперсионного упрочнения сплавов.

Карбид гафния получали путем механохимического синтеза в системе Hf–C. В качестве исходных материалов использовали порошок гафния марки ГФМ-1, полученный кальциетермическим восстановлением, дисперсностью менее 50 мкм и чистотой 98,7 %, а также технический углерод марки П-803.

Виброобработку смеси Hf + C осуществляли в атмосфере ацетилена (C₂H₂), смеси газов (пропан + бутан + изобутан), пропана (C₃H₈), воздуха, активацию исходных компонентов и механохимический синтез HfC — в герметичном контейнере энергонапряженной вибромельницы, работающей при частоте колебаний

контейнера 750 мин⁻¹ и амплитуде 90 мм. В качестве помольных тел использовали стальные шары марки ШХ-15 диаметром 15 мм. Фазовый состав порошковых продуктов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker). Распределение частиц по размерам и гранулометрический состав определяли с помощью лазерного анализатора частиц Анализетте 22 NanoTec/MikroTec/XT фирмы Fritsch.

Механическая активация смеси порошков гафния и сажи в атмосфере ацетилена, смеси газов (пропан + бутан + изобутан), пропана и воздуха способствует механохимическому синтезу HfC. Максимальное количество HfC при наименьшем намоле помольных тел наблюдается при механоактивации смеси Hf + C в атмосфере пропана; в смеси содержится 91,6 % HfC и 8,4 % Fe. Порошок HfC, полученный после вибрационной обработки смеси Hf + C с использованием пропана в качестве рабочей атмосферы, является высокодисперсным продуктом с приемлемым химическим составом для применения в традиционной и порошковой металлургии, а также для производства огнеупорных и абразивных материалов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИТРИДА БОРА С ТИТАНОМ В СИСТЕМЕ В–N–Ti

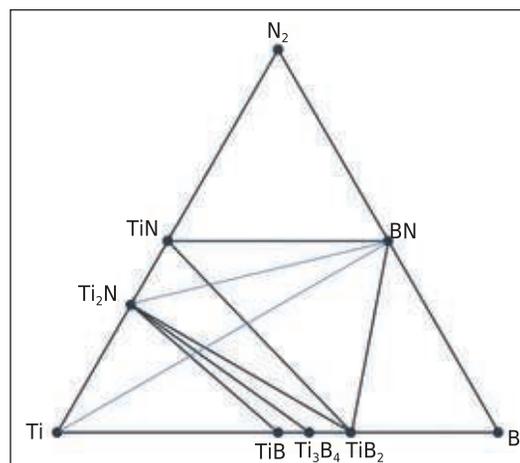
(✉)

E-mail: RudenokLP@virial.ru

© Л. П. Руденко^{1,2} (✉), д. т. н. С. А. Суворов¹, В. И. Румянцев²¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, Санкт-Петербург, Россия² ООО «Вириал», Санкт-Петербург, Россия

Системы кубический нитрид бора — переходные металлы IV группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева представляют значительный интерес как физико-химическая основа получения тугоплавких соединений и создания композиционных материалов. Материалы на их основе перспективны при создании термически стабильного высокотвердого режущего инструмента, устойчивого к ударным и коррозионным воздействиям. Для выбора наиболее вероятных взаимодействий титана с BN использовали программу Materials Project. При расчете прохождения возможных реакций была выделена реакция $3Ti + 2BN \rightarrow 2TiN + TiB_2$, а на основе полученных данных смоделирована фазовая диаграмма В–N–Ti (см. рисунок). Из фазовой диаграммы видно, что между Ti и BN, а также между Ti_2N и BN должно происходить взаимодействие, окончательными продуктами которого будут TiN и TiB_2 .

Проведенные исследования с использованием рентгенофазового анализа показали, что в интервале 720–730 °С происходит образование Ti_2N . С повышением температуры до 1400–1500 °С наблюдается образование новых продуктов реакции, а именно TiN и TiB_2 .



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

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИПОЛУЧЕНИЕ ЛЕГКОВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ТЭС

(✉)

E-mail: marinarumi@yandex.ru

© К. х. н. М. Х. Руми (✉), Ш. К. Ирматова, к. т. н. Ш. А. Файзиев, Э. М. Уразаева, Э. П. Мансурова, М. А. Зуфаров

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

Отходы сжигания угля на ТЭС являются одними из наиболее востребованных и широко применяются в производстве бетонов и в составах масс для получения теплоизоляционных изделий на глинистом сырье. Настоящее исследование было проведено с целью определения возможности использования золошлаковых отходов (ЗШО) Новоагренской ТЭС в производстве легковесных (теплоизоляционных) материалов.

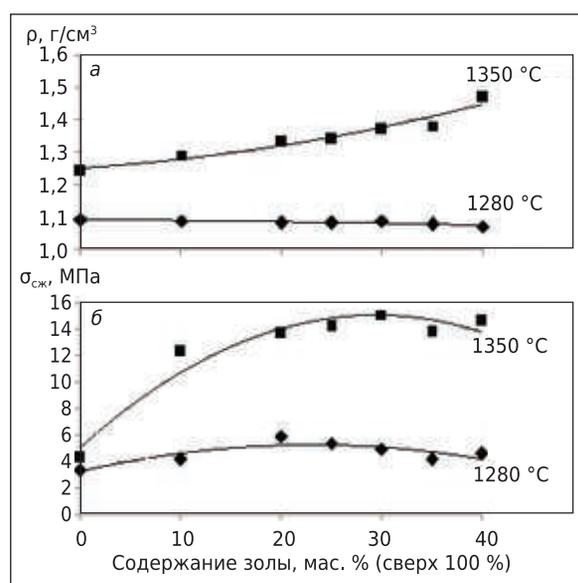
При подготовке составов шихты помимо отходов ТЭС были использованы разные сырьевые материалы Ангренского месторождения Узбекистана — шамот из обогащенного первичного каолина марки АКС-30, каолинистая глина в качестве связующего, кокс в качестве выгорающей добавки. Соотношение шамот: связующее составляло 60:40 мас. %. Зола и кокс вводили (сверх 100 %) в количестве 10–40 и 30 мас. % соответственно. Образцы получали методом полусухого прессования под давлением 10 МПа и обжигали при 1280 и 1350 °С.

ЗШО по своему химическому составу (SiO_2 51,25, Al_2O_3 25,34, Fe_2O_3 _{Зобщ} 3,28, CaO 3,08, MgO 1,21, TiO_2 0,19, Na_2O 4,04, K_2O 3,01, P_2O_5 0,12, MnO 0,05, SO_3 _{Зобщ} 3,09, $\Delta m_{прк}$ 8,40, мас. %) относятся к кислым золам. Алюмо-силикатный модуль SiO_2/Al_2O_3 составляет 2,02 и входит в диапазон $SiO_2/Al_2O_3 = 3,00 \div 1,77$, который, согласно классификации Б. Мейсона, принадлежит к каолинистым глинам. Значение показателя плавкости $M = (SiO_2 + Al_2O_3)/(Fe_2O_3 + CaO + MgO + R_2O)$ используемой золы ЗШО, равный 5,2, позволяет отнести ее ко второй группе зол с температурой размягчения 1350–1450 °С. Микроскопический анализ ЗШО показал, что большая их часть (зола) представлена слабо спеченными частицами неправильной формы, количество тонкостенных микросфер невелико. Основную часть (~ 85 мас. %) составляют частицы размерами менее 100 мкм насыпной плотностью 800–900 кг/м³. Фазовый состав ЗШО представлен стеклофазой, а также α -кварцем, муллитом, кристобалитом и кальцитом. После обжига при 1280 °С количество α -кварца уменьшается, а основными кри-

сталлическими фазами являются муллит, кристобалит, плагиоклазы ряда альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, а также гематит.

Согласно полученным результатам (см. рисунок), при температуре обжига 1280 °С введение золы в количестве до 40 мас. % позволяет повысить предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ образцов от 3,4 до 4,2–6 МПа при сохранении плотности ρ в диапазоне 1,07–1,085 г/см³. При этой температуре зола действует в большей степени как отошитель, однако присутствие в ее составе стеклофазы положительно влияет на прочностные характеристики. Обжиг при 1350 °С приводит к резкому повышению $\sigma_{\text{сж}}$ до 12–15 МПа, которое, однако, сопровождается соответствующим увеличением ρ до 1,30–1,47 г/см³. Такое резкое изменение характеристик обусловлено изменением фазового состава. При повышении температуры от 1280 до 1350 °С происходит полный переход плагиоклазовой составляющей в стеклообразное состояние, улучшающее спекание.

Таким образом, проведенные исследования показали, что количество золы, применяемой в качестве упрочняющей добавки, определяется требованиями к алюмосиликатным легковесным огнеупорам и технологическими условиями их получения. Ее количество мо-



жет достигать 30 мас. % при обжиге при 1280 °С и 10 мас. % при 1350 °С.

Работа выполнена по гранту ФА-Атех-2018-88.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

✉
E-mail: chemic@yandex.ru

ОКСИДЦИРКОНИЕВАЯ ПОРИСТАЯ КЕРАМИКА, ПОЛУЧЕННАЯ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ВСПУЧИВАНИЯ

© Е. А. Севергина, 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

Благодаря сочетанию таких свойств, как высокие тугоплавкость (температура плавления 2715 °С), прочность и вязкость разрушения, а также химическая инертность керамика на основе ZrO_2 является перспективным материалом для изготовления изделий ответственного назначения и высокопрочных конструкций, работающих в условиях значительных механических нагрузок в сочетании с высокой температурой и агрессивной средой. Это позволяет применять керамику на основе ZrO_2 в разных отраслях.

На кафедре химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов СПбГТИ (ТУ) разработаны метод и технология синтеза высокопористого керамического материала с применением химического вспучивания с последующей стабилизацией водного шликера. В качестве огнеупорного наполнителя может быть использован дисперсный порошок корундового, муллитового, кремнеземистого или оксидциркониевого состава. Предложенный комплексный органический порообразователь не

имеет недостатков, свойственных порообразователям, используемым при традиционных методах получения пористых структур, обеспечивает вспучивание водного шликера при нагреве до 100–150 °С с последующей его стабилизацией (затвердеванием). Порообразователь практически полностью выгорает в процессе высокотемпературного обжига до получения химически чистого керамического материала с однородной пористой структурой.

В результате лабораторных исследований определены оптимальный режим измельчения исходного материала (ZrO_2), оптимальные влажность водного шликера и концентрация комплексного органического порообразователя, продолжительность выдержки и температурный режим вспучивания. Синтезирована пористая оксидциркониевая керамика, обладающая однородной мелкопористой структурой открытой пористостью до 47,7 % и кажущейся плотностью 3,15 г/см³ с пределом прочности при изгибе при комнатной температуре до 172,5 кг/см².



E-mail: nikbardin@mail.ru

© Д. т. н. В. Н. Соков (✉)

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

Способ вибропрессования при получении высокопористых корундовых изделий из глиноземо-пенополистирольных масс позволяет снизить количество воды затворения на 20–25 % по сравнению с литейной технологией и на 35–40 % пеновым методом. Влажность глиноземо-пенополистирольных масс, позволяющая производить немедленную распалубку, 19–22 %. Выбор параметров вибропрессования производился с учетом присутствия в массе легкой выгорающей добавки (80 об. %), большого различия плотности зерен основного материала и выгорающей добавки, способности пенополистирола деформироваться при относительно небольших нагрузках ($> 0,035$ МПа) и восстанавливать свою форму после снятия прессующих усилий. При установлении оптимальных параметров вибропрессования рассматривали следующие независимые переменные: амплитуду и частоту вибрации, прессующее усилие и влажность формовочной массы. За параметр оптимизации принимали прочность сырца и обожженных изделий.

Следует отметить значительную разницу между средней плотностью зерен пенополистирола ($0,02–0,05$ г/см³) и глиноземистого теста ($2,2–2,4$ г/см³). Кроме того, такая смесь будет обладать весьма низкой средней плотностью ($0,25–0,29$ г/см³). Необходимо учесть еще и то, что в момент формования изделий легкодеформируемая выгорающая добавка под действием сжимающих усилий деформируется, а затем после снятия усилий стремится восстановить свой первоначальный объем и форму, нарушая при этом сплошность сырца и образуя в нем трещины. Таким образом, при вибропрессовании глиноземо-пенополистирольных смесей должен существовать определенный предел прессующего давления, способный вызвать в пенополистироле лишь мгновенную упругую деформацию, которая не вызывает редуформацию, способную нарушить сплошность сырца.

Применение сферической выгорающей добавки (пенополистирола) позволило в широких пределах регулировать размер пор теплоизоляционного корунда (от 0,1 до 5–10 мм), что имеет важное значение при получении изделий разного назначения (для теплоизоляции или фильтров). Рекомендуемый диаметр зерен бисерного полистирола для получения теплоизоляционных изделий примерно 0,5 мм.

В процессе исследований было установлено следующее.

- Параметры вибропрессования глиноземо-пенополистирольных масс: амплитуда колебаний

вибрационного механизма 0,85–1,0 мм, частота колебаний 3000 колебаний/мин, усилие пригруза 0,025–0,03 МПа, продолжительность вибрационной обработки 60–70 с. Установлен следующий порядок уплотнения глиноземо-пенополистирольной смеси: вначале на массу воздействует вибрация (5–7 с), а затем, постепенно увеличиваясь, прикладывается прессующее усилие. Применение в составе смеси необожженного мелкого технического глинозема в количестве 60–70 % в сочетании с молотым обеспечивает получение относительно высокой прочности сырца (0,4–0,5 МПа) и обожженных изделий (до 5–6 МПа).

- При изготовлении глиноземо-пенополистирольных масс выгорающую добавку перед смешиванием необходимо обрабатывать раствором ПАВ. Введение сухого огнеупорного порошка в предварительно увлажненный пенополистирол при непрерывном перемешивании обеспечит получение достаточно однородной смеси. В этом случае зерна пенополистирола, обладая улучшенными адгезионными свойствами, будут удерживать на своей увлажненной поверхности частицы порошка подобно тому, как это происходит при минерализации пен. Огнеупорный порошок покрывает зерна пенополистирола равномерно и не осыпается, масса не комкуется, удобна в работе, не налипают на оборудование и легко высыпается из мешалки. Этот прием позволяет получать достаточно однородную массу и, как следствие, прочный сырец (0,6–0,7 МПа), способный выдерживать погрузку изделий на обжиг в несколько рядов.

- При получении корундовых легковесных изделий из глиноземо-пенополистирольных масс прочность сырца и готовых изделий снижается (возможно и разрушение) из-за повторного вспенивания пенополистирола в процессе сушки сырца, поэтому его необходимо обрабатывать теплоносителем до полного удаления вспенивающего агента. Полноту вспенивания рекомендуется определять по коэффициенту вспенивания или по изменению средней плотности зерен пенополистирола. Длительность обработки бисерного полистирола фракции около 0,5 мм составляет в водяной бане 60 мин, паром 5 мин.

- При разогреве сырца в обжиге разложение и удаление выгорающей добавки происходит особенно интенсивно в интервале 250–320 °С. В этот период газообразные продукты разложения пенополистирола могут вызвать нарушение сплошности сырца. Для замедления активного газовыделения и исключения деструкции материала скорость разогрева сырца в указанном интервале температур необходимо снижать до 10–15 °С/ч.

• Разработана методика контроля постоянства заданных размеров теплоизоляционного корунда, позволившая ликвидировать дорогостоящую операцию — обрезку изделий. Для практического осуществления контроля конечных размеров изделий после обжига построены номограммы.

Предложенная технология представляет интерес как весьма перспективная, позволяющая улучшить качество изделий, снизить среднюю плотность

до 0,7–1,0 г/см³, а также механизировать все основные технологические процессы. Реализация результатов исследований и вышеуказанных рекомендаций позволяет повысить технико-экономические показатели изделий. Переход от литейной технологии к вибрационной технологии производства теплоизоляционных корундовых изделий с сушкой на поддоне и исключение их обрезки снижает себестоимость 1 м³ изделий в целом на 40 %.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СТЕПЕНЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФЕНОЛА ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ УГЛЕРОДНОГО СОРБЕНТА

(✉)

E-mail: s2305028@yandex.ru

© К. т. н. **А. И. Солдатов**, к. т. н. **С. И. Боровик** (✉), **И. Р. Гилязова**

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

Фенол и его производные широко используют при производстве огнеупоров, смол и полимерных материалов, каучуков, в фармацевтике, в технологии ПАВ и лаков, пластификаторов, стабилизаторов и т. д. Активное использование фенолов привело к тому, что соединения этой группы часто встречаются в составе сточных вод. Известно, что фенол относится к числу опасных загрязнителей окружающей среды и является высокотоксичным соединением, оказывающим крайне неблагоприятное действие на живой организм. Одноатомные фенолы — сильные нервные яды, вызывающие общее отравление организма даже через кожу. Процесс адсорбции широко применяется в различных технологиях, методах очистки газов и жидкостей. В частности, адсорбция на углеродных сорбентах является наиболее универсальным способом обесфеноливания сточных вод. Агентство по охране окружающей среды США назвало адсорбцию на углеродных сорбентах, в частности на активированном угле, одной из лучших технологий контроля окружающей среды. Важной особенностью этого процесса является возможность многократного использования сорбента в процессе очистки после проведения его регенерации. Фактором, существенно влияющим и на процедуру регенерации сорбента, является тип адсорбции. По современным представлениям фенол может сорбироваться на поверхности углеродного сорбента путем физической и химической адсорбции. Компоненты, которые физадсорбированы на поверхности сорбента при регенерации, могут быть легко удалены, например, экстракцией, тогда как хемосорбированные компоненты удаляются с большим трудом и с частичным разрушением сорбента. И хотя существует огромное число отечественных и зарубежных исследований адсорбции фенола, до сих пор не определены принципы выбора наиболее эффективного углеродного сорбента для адсорбционной очистки и оптимальные методы утилизации насыщенных фенолом сорбентов.

Цель данной работы — определение факторов, влияющих на степень регенерации углеродных сор-

бентов, использованных для очистки водных стоков от фенола.

Использовали 7 марок углеродных сорбентов, различающихся по исходному сырью и способу активации. Структуру и свойства поверхности изучаемых материалов оценивали по удельной поверхности, содержанию кислотных и карбонильных групп, восстанавливающей способности, рН водной вытяжки. Адсорбцию фенола на углеродной поверхности проводили в стационарных условиях (концентрация фенола 0,1 моль/л, температура 25 °С, время адсорбции 1 ч). Показатель адсорбции определяли из расчета на единичный фрагмент поверхности. Судя по результатам экспериментальных данных, показатель адсорбции фенола зависит от количества карбонильных групп на поверхности, что согласуется с литературными данными.

Все методы регенерации адсорбентов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, позволяющие выделить из отработанных адсорбентов поглощенные вещества в виде продуктов, представляющих техническую ценность. В этом случае восстановление активности адсорбента сочетается с уменьшением потерь ценного сырья и продуктов производства или с получением вторичной товарной продукции, стоимость которой в большей или меньшей мере окупает затраты на очистку сточных вод. Ко второй группе относятся методы регенерации адсорбентов, основанные на возможно полной деструкции адсорбированных соединений и окислении их до конечных продуктов — CO₂, H₂O, N₂ и т. д. Применение этих методов оправдано во всех случаях, когда выделение идет из многокомпонентных сточных вод. Для регенерации использовали методы, относящиеся к первой группе и заключающиеся в десорбции органических веществ методом их ионизации или в регенерации адсорбентов экстракцией органическими растворителями. Для регенерации было выбрано два сорбента, которые характеризуются разными показателями адсорбции фенола — сульфоуголь (СУ), показавший наилучшую

адсорбцию фенола, и активированный уголь марки АГ-2, являющийся одним из худших сорбентов из числа исследованных.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что хотя доля фенола, удаленного раствором щелочи, в 7–10 раз выше, чем CCl_4 , результат нельзя считать удовлетворительным из-за низкой степени извлечения. Далее оценивали влияние времени и условий хранения сорбента перед регенерацией (под слоем воды и в сухом состоянии).

Результаты показали, что в течение 36 ч после проведения адсорбции количество фенола, переходящего в раствор щелочи, составляет 70,59 и 62,71 %

для СУ и АГ-2 соответственно, а через 72 ч снижается примерно вдвое (41,18 и 28,81 %), тогда как через 144 ч составляет только 29,41 и 8,47 %.

При хранении насыщенного фенолом сорбента под слоем воды доля извлечения фенола в течение 144 ч не меняется и составляет 70,59 и 62,71 % для СУ и АГ-2 соответственно. На основании анализа полученных результатов сделаны следующие выводы: при хранении сорбента в сухом состоянии в течение первых 36 ч степень извлечения максимальна, а при дальнейшем хранении заметно снижается; при хранении сорбента под слоем воды степень извлечения фенола не меняется.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НАНОДИСПЕРСНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕУПОРНОЙ КЕРАМИКИ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: suvorov8225@yandex.ru

© Д. С. Суворов¹ (✉), Б. Б. Хайдаров¹, Д. В. Лысов¹, В. И. Казаков², к. т. н. В. В. Горчаков³,
К. т. н. Д. В. Кузнецов¹

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ООО «Функциональные наноматериалы», Москва, Россия

³ ООО НПП «Интор», г. Новочеркасск, Россия

Предприятия металлургического комплекса заинтересованы в снижении такого важного показателя, как материальные затраты на исходное сырье. В частности, улучшение главных эксплуатационных характеристик огнеупорных бетонов является важной задачей как с промышленной, так и с материаловедческой точки зрения. Ее решение позволит не только улучшить качество выпускаемой продукции, но и повысить такие немаловажные показатели, как производительность и рентабельность производства. В этой связи помимо разработки принципиально новых видов огнеупорных изделий существует вариант возможного модифицирования уже имеющихся материалов с применением разных высокодисперсных модифицирующих добавок. В настоящее время такой подход уже используется во многих областях промышленности. Главными остаются проблемы выбора типа модифицирующей добавки и ее количества, а также достижения высокой степени гомогенности вяжущего материала.

- Проведено лабораторное и промышленное модифицирование двух видов алюмосиликатных связующих высокодисперсными материалами. Показана возможность применения вихревого электромагнитного гомогенизатора для модифицирования ультрадисперсными компонентами огнеупоров, что значительно улучшает структурные и вяжущие свойства огнеупорных связующих и эксплуатационные характеристики огнеупорных бетонов на их основе. Установлены эффективность использования нанодисперсного диоксида кремния и его оптимальная концентрация.

- Показано влияние наномодифицирования на структурные и физико-механические характеристики муллитокорундовых огнеупоров разного типа (для

фурм УПК и опорных блоков телег ЛПЦ). Опытные образцы исследовали с применением современных методов, в том числе метода низкотемпературной адсорбции азота (для определения удельной поверхности), растровой электронной микроскопии, гелиевой пикнометрии, а также методами разрушающего и неразрушающего контроля предела прочности при сжатии и термоциклирования. Все исследования выполняли с использованием вихревого электромагнитного гомогенизатора (ВЭГ-80), который был разработан и НПП «Интор» совместно с кафедрой ФНСиВТМ НИТУ МИСиС.

- Определены оптимальные параметры процесса модифицирования огнеупорных материалов разного назначения с точки зрения его влияния на их физико-химические параметры. Оптимальная концентрация наночастиц SiO_2 в образцах бетонов составила 1 % (в пересчете на массу вяжущего материала) как для фурменного бетона, так и для бетона блоков телеги. Достигнуто увеличение истинной пикнометрической плотности на 11 и 20 % бетонов для блоков и фурм соответственно. При этом прирост прочности в конечных изделиях после обжига составил 25 % (на бетоне для блоков телег ЛПЦ) и 32 % (на бетоне для фурм УПК).

Результаты проведенных исследований указывают на возможность за счет наномодифицирования улучшить эксплуатационные характеристики огнеупорных изделий из неформованных муллитокорундовых масс не менее чем на 20 %. Промышленное освоение этой технологии обеспечит существенный экономический эффект за счет снижения затрат на закупку огнеупорных материалов и увеличения межремонтных циклов.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ
НА ПРОЦЕССЫ ИЗНОСА ФУТЕРОВКИ**(✉)
E-mail: arbusowai@mail.ru© Д. т. н. **С. А. Суворов**, 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

Для разработки модели прогноза износа периклазоуглеродистой футеровки за 1 плавку исследовали взаимосвязи регулируемых технологических параметров, а также технологических констант. Установлено следующее.

- Расход рабочего слоя периклазоуглеродистого материала футеровки кислородного конвертера за 1 плавку определяется продолжительностью плавки, температурой ванны, которая достигается в процессе продувки, разностью между содержанием MgO в шлаке и его предельной растворимостью, объемной долей MgO в огнеупоре, удельной поверхностью контактной зоны шлака и обезуглероженного слоя огнеупора. Растворимость MgO в шлаке определяется, прежде всего, его основностью (CaO/SiO₂) и температурой.

- Удельная поверхность контактной зоны шлака и обезуглероженного слоя огнеупора и объемная доля MgO в периклазоуглеродистом огнеупоре являются характеристиками огнеупорного материала и практически не меняются в течение компании конвертера. Их можно признать технологическими константами.

- Увеличение внутреннего диаметра футеровки конвертера из-за ее износа и снижение высоты шлакового пояса (при неизменном объеме шлака за плавку) приводят к повышению шлаковой нагрузки на огнеупор шлакового пояса.

- Предельная растворимость MgO в шлаке, содержание MgO и химический состав шлака, температура ванны, продолжительность продувки не являются независимыми технологическими параметрами, так как зависят от других параметров.

- Химический состав шлака определяется количеством и составом чугуна, лома, шлакообразующих

флюсов и охладителя, а также толщиной и составом гарнисажного слоя, сформированного в конце предыдущей плавки. Химический состав шлака зависит также от степени окисления железа металлической ванны, которая в свою очередь определяется количеством дутья (O₂). Расход кислорода определяется исходной концентрацией углерода и других элементов в металлошихте (состав чугуна и лома) и их требуемой концентрацией в металле на выпуске плавки.

- Температура ванны определяется исходным теплосодержанием (температурой) чугуна, расходом дутья (O₂) и должна быть не ниже уровня, требуемого для дальнейшей обработки металла. Продолжительность продувки определяется, исходя из необходимого расхода кислородного дутья.

- Влияние гарнисажного слоя заключается в прямом снижении расхода футеровки за плавку и в изменении химического состава шлака в сторону повышения содержания в нем MgO. Толщина образующегося гарнисажного слоя определяется тепловым сопротивлением футеровки и эффективной теплотой затвердевания подготовленной шлаковой суспензии. Тепловое сопротивление футеровки зависит от теплопроводности и теплоемкости применяемых огнеупоров (технологические константы) и остаточной толщины рабочего слоя футеровки. Эффективная теплота затвердевания шлаковой суспензии зависит от ее химического состава, который определяется количеством и составом шлака, оставленного после выпуска плавки, количеством и составом применяемого модификатора конечного конвертерного шлака.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ
ОКСИДНО-УГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**(✉)
E-mail: chemic@yandex.ru© Д. т. н. **С. А. Суворов**, 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

Рабочий слой футеровки кислородного конвертера или сталеразливочного ковша перед вводом в эксплуатацию необходимо предварительно разогреть до 1000–1200 °С. Разогрев производят в окислительной атмосфере с помощью газовых горелок. В качестве топлива используют природный газ, сжигаемый при избыточном количестве воздуха. Как правило, этот процесс занимает до 40 ч. В результате разогрева футеровки происходит выгорание углерода с рабочей поверхности периклазоуглеродистого огнеупора и формируется пористый обезуглероженный слой, толщина которого тесно связана с составом атмосферы и температурным режимом разогрева.

Проведенные разными исследователями расчеты и промышленные эксперименты показали, что при предварительном разогреве футеровки сталеразливочного ковша толщина пористого обезуглероженного слоя может достигать порядка 10 мм, что примерно эквивалентно потере 10 % ресурса периклазоуглеродистого рабочего слоя футеровки. Содержание графита и коксового остатка по-разному влияет на скорость окисления оксидно-углеродистых материалов. Кинетика окисления коксового остатка на 1–2 порядка выше, чем у крупнокристаллического чешуйчатого графита.

Для повышения устойчивости оксидно-углеродистых огнеупоров к окислению применяют

разные добавки-антиоксиданты (АОХ). Наиболее распространенными антиокислителями в составе углеродистых огнеупоров являются порошки алюминия и кремния, а также некоторые карбиды и бориды металлов (SiC, B₄C). Положительное влияние металлических антиокислителей выражается в уплотнении структуры обезуглероженного слоя огнеупора, снижении его пористости за счет образования новых фаз при взаимодействии добавок с углеродом, кислородом и оксидной частью огнеупора. Уплотнение обезуглероженного слоя затрудняет диффузию окислителя через него и снижает скорость дальнейшего окисления углеродной части огнеупора.

Динамика образования обезуглероженного слоя на поверхности периклазоуглеродистого огнеупора определяется температурным режимом разогрева футеровки, концентрацией окислителя в газовой атмосфере, а

также зависит от пористости огнеупора, содержания в нем углерода (в виде графита и коксового остатка), его чистоты, количества и качества применяемых в составе огнеупора антиокислительных добавок.

На кафедре химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов СПбГТИ (ТУ) разработано программное обеспечение для расчета толщины обезуглероженного слоя, образующегося при разогреве оксидно-углеродистых материалов в окислительной газовой среде, на основе данных о режиме изменения температуры с учетом его параметров и фазового состава огнеупора. Программное обеспечение может быть использовано при регулировании фазового состава оксидно-углеродистых материалов для повышения их устойчивости к окислению и оптимизации режима разогрева футеровки агрегата при вводе его в эксплуатацию.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

✉

E-mail: chemic@yandex.ru

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КАРБОНИРОВАННЫХ ШПИНЕЛЬНОКОРУНДОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШАХ

© Д. т. н. С. А. Суворов, 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

Кладка рабочего слоя футеровки 400-т сталеплавильных ковшей № 11 и № 29 в зоне ванны металла с 1-го ряда по 31-й и с 32-го по 41-й выполняли карбонированными шпинельнокорундовыми огнеупорами. Рабочий слой толщиной 150 мм футеровки ковша № 11 в зоне ванны металла выкладывали на карбонированном шпинельнокорундовом мертеле, затворенном безводным пластификатором ВТМ, рабочий слой ковша № 29 — на водном высокоглиноземистом мертеле, используемым в ПАО «Северсталь».

Технологический ресурс эксплуатации рабочего слоя футеровки ковша № 11 (100 плавов) и ковша № 29 (89 плавов) ограничен выводом ковшей из эксплуатации в связи с разрушением огнеупоров в шлаковом поясе и продувочных фурм, а не с повреждением опытной футеровки. Остаточная толщина рабочего слоя футеровки ковша № 11 до 0,104 м (69,3 %) при износе 0,046 м (30,7 %) и ковша № 29 соответственно до 0,098 м (65,8 %) при износе 0,057 м (34,6 %) сопровождается загрязнением расплава металла продуктами разрушения огнеупоров с переходом 60,4–70,9 кг этих продуктов в ковш с металлом (375 т за одну плавку). Эксплуатационные характеристики ковшей приведены в таблице.

Использование удельной весовой ресурсной характеристики, кг/(м²·ч), необходимо для балансовых расчетов износа огнеупоров в рабочем слое футеровки и перешедших в ванну металлического расплава сталеплавильного ковша продуктов износа огнеупоров, негативно влияющих на качество расплава и закристаллизованного металла. Введение объективного инструментального измерения износа огнеупоров и конструкций из них, г (кг, т), позволит проводить нормирование требований к качеству огнеупоров по степени загрязнения и снижения марочности металла, требующих больших дополнительных затрат на их устранение.

Характеристика	Ковш № 11	Ковш № 29
Объем изношенной футеровки, м ³	1,84	1,94
Число проведенных плавов	100	89
Расход толщины рабочего слоя, мм	0,075	0,101
Удельный расход футеровки, 10 ⁻¹ кг/(м ² ·ч):		
максимальный: ряды с 40-го по 41-й	7,0	8,8
минимальный: ряды с 35-го по 37-й	3,0	3,9
Удельное количество перешедших в расплав стали продуктов разрушения футеровки на одну плавку 375 т стали, кг/плавки	60,4	70,9
* Расход футеровки в шлаковой зоне 13,6 кг/(м ² ·ч).		

Взаимодействие реагентов расплава с огнеупором сопровождается ошлаковыванием его приповерхностного слоя. При этом формируется промежуточный (разграничивающий) расплавленный слой с различающимся поверхностным натяжением обезуглероженной поверхности огнеупора и шлакового расплава. Этот промежуточный слой ускоряет движение потоков шлака по ошлакованной поверхности и растворение огнеупора.

Образующийся на горячей поверхности футеровки расплав толщиной 1–4 мм после остывания футеровки диагностируется как стеклообразный плотный слой без разрывов сплошности. Этот слой в результате активного регулятивного участия состава огнеупорного материала (87–90 мас. % Al₂O₃, 5,5–8,0 мас. % MgO, 5,0–6,0 мас. % С, 1,5–2,5 мас. % примеси) и его пористой структуры (общая пористость 16–18, открытая 8–12, закрытая 4–8 %) улучшает ресурсные характеристики карбонированных шпинельнокорундовых изделий при их службе в рабочем слое футеровки 400-т ковшей для внепечной обработки марочных сталей.

**ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ КАРБОНИРОВАННЫХ
ШПИНЕЛЬНОКОРУНДОВЫХ ОГНЕУПОРОВ**(✉)
E-mail: arbusowai@mail.ru

© Д. Т. Н. С. А. Суворов, К. Т. Н. В. В. Козлов, Н. В. Арбузова (✉)

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

В исследованиях использованы 12 исходных базовых химических составов 7-компонентной системы Al_2O_3 – MgO – CaO – Fe_2O_3 – SiO_2 – $Al_{мет}$ – $C_{углерод}$ из выделенной области ограниченной следующим составом, мас. %: 70,0–92,0 Al_2O_3 , 1,8–8,0 MgO , 0,04–0,25 CaO , 0,7–2,15 Fe_2O_3 , 0,15–3,8 SiO_2 , 2,0–3,5 $Al_{мет}$, 2,5–12,5 $C_{углерод}$. Изготовлены образцы огнеупорных материалов, структура которых формировалась образованием фаз Al_2O_3 , $MgAl_2O_4$, Al_4C_3 – C в определенном соотношении в зависимости от температуры и исходного химического состава.

Первичная структура безобжиговых карбонированных шпинельнокорундовых огнеупоров, сформированная при условиях и параметрах реализованной технологии, в других случаях подвергается перерождению и ухудшает ресурсные показатели огнеупорного изделия, в том числе из-за газификации углерода: $2C_{тв} + (CO_{газ} + CO_{2газ})$. Торможение и/или предотвращение выгорания углерода может достигаться ограничением и/или затруднением поступления в огнеупор объема газовой среды, содержащей окислитель. Процессы, сопровождающие выгорание углерода из материала, формируют микроструктуру карбонированного огнеупора,

объем и вид пористости, размер пор и их распределение (см. таблицу).

Установлены пороговые значения содержания углерода 5–8–10–12 мас. %, при которых происходит скачкообразное изменение свойств (прочность, термостойкость, пористость структуры, пропитка расплавом шлака).

Функциональная взаимосвязь между свойствами определяется проявлением и условиями дивергентной направленности изменения показателей свойств, ведущих к деградации материала, снижения возможности сопротивления материала, изделия, конструкции противостоять внешним нагрузкам в итоге завершается разрушением и/или потерей временного ресурса эксплуатации материала, изделий, конструкций, агрегатов.

Экспериментально установлены и определены взаимосвязи поризации с декарбонизацией карбонированных шпинельнокорундовых огнеупоров от факторов внешнегазонагружения. Декарбонизация увеличивается с повышением температуры, с повышением содержания окислителя и повышением объемов газовой среды, поступающих в зону реакций.

Образец*	Температура обжига, °С	Среда при воздействии высокой температуры	Пористость, %	Размер пор, мкм			
				130–100	100–20	20–5	<5
КШКО	300	Воздушная	11,15	0,65	5,50	9,2	84,67
КШКО	1000	Восстановительная	14,61	1,83	14,13	26,79	57,25
КШКО	1300	Окислительная (необезуглероженная зона)	15,12	1,95	18,21	25,96	55,81
КШКО	1510	Окислительная (обезуглероженная зона)	24,56	1,02	17,7	70,98	10,29

* Исходное содержание углерода 5,4–5,6 мас. %.

**СИНТЕЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА ВИСМУТА $Bi_2Ti_4O_{11}$** (✉)
E-mail: chemist.alexandr@gmail.com© К. Т. Н. В. Л. Уголков¹, Н. А. Ломанова², А. В. Осипов¹ (✉)¹ ФГБУН «Институт химии силикатов имени И. В. Гребенщикова РАН», лаборатория физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов, Санкт-Петербург, Россия² ФГБУН «Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе», лаборатория новых неорганических материалов, Санкт-Петербург, Россия

Развитие микроволновой техники обуславливает спрос на высокопроизводительные диэлектрические материалы для изготовления микроволновых компонентов, таких как резонаторы, волноводы, антенны и т. д. В качестве таких материалов перспективны титанаты висмута системы Bi_2O_3 – TiO_2 , имеющие низкую температуру спекания и высокую диэлектрическую проницаемость. Среди известных титанатов висмута соединение $Bi_2Ti_4O_{11}$ имеет самую высокую термическую устойчивость. Это соединение существует в

двух модификациях: α - $Bi_2Ti_4O_{11}$ является антисегнетоэлектриком, а β -фаза находится в параэлектрическом состоянии. Синтез керамических материалов на основе $Bi_2Ti_4O_{11}$ является актуальной задачей, поскольку их сложно получить однофазными в связи с испарением оксида висмута при протекании твердофазной реакции выше 900 °С.

В данной работе синтезирован однофазный поликристаллический материал на основе $Bi_2Ti_4O_{11}$ из исходной композиции, полученной термическим раз-

ложением соосаженных гидроксидов. В качестве реагентов для приготовления исходного раствора солей использованы пентаводный нитрат висмута $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и изопропоксид титана $\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$. Методом рентгенофазового анализа установлено, что формирование $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ происходит поэтапно. На начальных стадиях синтеза ($< 600^\circ\text{C}$) в реакционной системе присутствует только рентгеноаморфное вещество. При 600°C кристаллизуется промежуточное соединение со структурой пиро-хлора $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. При 700°C вследствие взаимодействия аморфного TiO_2 с $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ происходит формирование $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ с размерами кристаллитов около 120 нм. Повышением температуры

($> 700^\circ\text{C}$) можно контролировать дисперсность полученного продукта. Методом элементного химического анализа установлено, что состав материала соответствует заданному стехиометрией.

Результаты комплексного термического анализа (ДСК/ТГ) показали, что процесс перитектического плавления $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$ начинается при 1230°C . На дилатометрической кривой $\Delta L/L_0$ полученного материала наблюдается $\alpha \rightarrow \beta$ -переход при 230°C , а спекание порошка начинается около 600°C . Таким образом, получен однофазный поликристаллический материал на основе $\text{Bi}_2\text{Ti}_4\text{O}_{11}$, термически устойчивый в диапазоне $700\text{--}1200^\circ\text{C}$.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)

E-mail: panch100@yandex.ru

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОВЕСНЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ТРАДИЦИОННЫХ СУХАРНЫХ КАОЛИНОВЫХ ГЛИН И ОТХОДОВ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ

© Э. М. Уразаева (✉), к. х. н. М. Х. Руми, Э. П. Мансурова, Ш. К. Ирматова, к. т. н. Ш. А. Файзиев, М. А. Зуфаров, Г. М. Арушанов

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

Огнеупорная легковесная керамика на основе алюмосиликатных глин играет одну из ведущих ролей среди современных видов огнеупорных изделий. Обеспеченность огнеупорной промышленности Узбекистана минеральным сырьем для получения таких материалов является неотложной задачей. В настоящее время в Институте материаловедения НПО «Физика–Солнце» разрабатываются рациональные технологии получения легковесной огнеупорной керамики с высокой пористостью, низкой теплопроводностью и удовлетворительной механической прочностью. Исследования проводятся по двум основным направлениям: 1 — использование как традиционных каолиновых глин, так и нетрадиционных, включая отходы обогащения отечественного природного сырья; 2 — создание современных технологий спекания легковесной керамики.

В работе проведена серия экспериментов по получению пористой керамики на основе алюмосиликатного сырья Узбекистана с низкотемпературной выгорающей добавкой в виде шариков пенополистирола (ППС). Отработку технологических параметров получения шамотных легковесных огнеупоров проводили на образцах с наполнителями различных фракционного (от 0,1 до 2,4 мм) и минерального составов (содержание Al_2O_3 в обожженном сырье от 17 до 39 мас. %). В качестве исходных материалов использовали разнообразные глины Ангренского месторождения (сухарная глина, черная каолиновая глина, первичный обогащенный каолин марки АКС-30) и Самаркандского месторождения (кварц-каолиновый

концентрат, первичный обогащенный каолин марки АКС), а также лом огнеупорных изделий на основе российского шамота (после службы в футеровке высокотемпературных печей). При выборе исходного сырья учитывали нормативные документы к сырьевым компонентам, а также технические требования к огнеупорным легковесным и огнеупорным шамотным изделиям (ГОСТ 5040–2015 и ГОСТ 390–2018). Из наполнителей на основе сахарной глины и кварц-каолинового концентрата без предварительного обжига формовали образцы с концентрацией выгорающей добавки ППС от 3 до 18 мас. %. Физико-технические свойства изучали на образцах, обожженных при $1300\text{--}1350^\circ\text{C}$.

Установлено влияние размера фракций ППС на возможность получения качественных образцов. Использование крупных фракций (диаметр 2,5–1,4 мм) приводит к растрескиванию изделий, по-видимому, из-за упругих деформаций ППС. Лучшим с точки зрения технологичности является следующий фракционный состав ППС, %: 1,4–0,8 мм 16, 0,8–0,5 мм 54, мельче 0,1 мм 30. На основе этого состава получены образцы с максимальным содержанием ППС — до 12–15 %.

Установлено, что керамику с плотностью, которая удовлетворяет требованиям ГОСТ 5040–2015, можно получить не из всех видов наполнителя. Наиболее поризованная керамика плотностью от 1060 до 1280 $\text{кг}/\text{м}^3$ получена с наполнителями в виде сахарной глины, ангренового шамота АКС-30, самаркандского шамота АКС (см. таблицу).

Наполнитель	Содержание ППС, %	Усадка, %	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, %
Сухарная глина	9–12	6,0–6,4	1220–1240	6–15	~50
Ангренский шамот АКС-30	6–9	3,7–5,7	1060–1100	3,5–5,5	~57
Самаркандский шамот АКС	9–12	2,9–3,6	1220–1280	15–18	~40

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛИ И ДИБОРИДА ТИТАНА МЕТОДОМ СВС-ЭКСТРУЗИИ

(✉)
E-mail: chij@ism.ac.ru

© К. т. н. **А. П. Чижиков** (✉), **А. С. Константинов**, **М. С. Антипов**, д. т. н. **П. М. Бажин**,
д. ф.-м. н. **А. М. Столин**

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

Работа посвящена решению научно-технологической проблемы получения компактных изделий из керамических композиционных материалов. В качестве объекта исследования использовали композиционный материал на основе алюмомагнезиальной шпинели, упрочненной диборидом титана. Для получения готовых изделий использовали метод СВС-экструзии, представляющий собой сочетание процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и последующего сдвигового деформирования. Перспективность использования этого метода обусловлена возможностью за десятки секунд проводить синтез материала из порошков исходных компонентов и формировать изделие заданного размера и формы в одну технологическую стадию, в том числе огнеупорные тиглы и чехлы для высокотемпературных термодар.

Методом СВС-экструзии были получены полые керамические стержни на основе композиционного материала $MgAl_2O_4-TiB_2$ диаметром 7 и длиной более 80 мм. Изучены характеристики горения исследуемых материалов в зависимости от относительной плотности исходной заготовки, а также влияние технологических параметров процесса СВС-экструзии (время задержки, давление прессования, скорость деформирования) на фазовый состав, структуру и качество получаемых изделий. Показано, что скорость деформирования оказы-

вает наибольшее влияние на процесс получения керамических полых стержней. Установлено, что, управляя значением этого параметра, можно получить полые стержни разного диаметра, а также стержни на основе диборида титана с оболочкой на основе алюмомагнезиальной шпинели. Изучен механизм формирования керамических полых стержней на основе эффекта «разбухания струи», который заключается в увеличении диаметра струи материала при его выдавливании через узкий формирующий канал небольшой длины. Этот эффект хорошо известен в технологической практике переработки полимеров и основывается на наличии у материала вязкоупругих свойств. Однако для СВС-материалов ранее такой эффект известен не был.

СВС-экструзия открывает принципиально новый подход к организации технологических процессов получения компактных огнеупорных керамических материалов и изделий, что создает благоприятные условия для их широкого внедрения в металлургии. Организация процесса прямого получения изделий из огнеупорных материалов и изделий в одну технологическую стадию методом СВС-экструзии позволит существенно сократить временные и экономические затраты на производство таких изделий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-73-00235)..

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ SiC–AlN

(✉)
E-mail: sh-shaban@yandex.ru

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

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», кафедра инженерной физики, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

Керамические материалы системы SiC–AlN являются перспективными для высокотемпературной электроники и привлекают к себе внимание специалистов сочетанием полезных свойств. Однако реализовать многие полезные свойства SiC можно только при получении плотного керамического материала. Для устранения рекристаллизации и активации процесса спекания можно ввести в спекаемый материал добавки, изоморфные карбиду кремния и образующие с ним при температуре спекания твердые растворы. К таким добавкам относится нитрид алюминия, имеющий структуру вюрцита, как и α -SiC.

Получены высокоплотные керамические материалы SiC–AlN и исследованы их структура и теплофизические свойства (теплопроводность, ТКЛР, теплоемкость) в интервале 300–1200 К. Керамика SiC–AlN была получена методом горячего прессования при температуре около 2170 К, давлении до 35 МПа в сре-

де N_2 в течение 1 ч. Кажущуюся плотность образцов измеряли методом гидростатического взвешивания; в интервале составов с содержанием AlN от 30 до 90 мас. % она в среднем составляла 3210–3220 кг/м³. Кажущаяся плотность образцов с 10 мас. % AlN составляла в среднем 3160 кг/м³, что соответствует пористости около 1,6 %. По данным дифрактограмм, в керамике состава SiC (30 %) – AlN (70 %) одновременно существуют две рентгеновские фазы: твердый раствор SiC–AlN и фаза AlN. С ростом содержания AlN более 70 мас. % стабилизируется политип 2H. Исследование микроструктуры горячепрессованных керамических материалов SiC–AlN после травления показало присутствие кислорода в нитридалюминиевой фазе, а также рельефной структуры при высокой концентрации AlN.

Исследование микрофотографий показало рост зерен до 10 мкм. Спектр химического состава указал на присутствие кислорода, а также рельефной

поверхности на впадинах (N, Al) и возвышенностях после травления (C, Si). В полупроводниковых твердых растворах на показатель теплопроводности и ее температурную зависимость влияют дефекты масс и упругие параметры решетки. Температурная зависимость фоновой теплопроводности выражается уравнением $\lambda_{\text{ф}} \sim T^{-n}$ ($n < 1$). Экспериментальные результаты исследования температурной зависимости теплопроводности керамики SiC–AlN хорошо описываются уравнением $\lambda \sim T^{-0,96}$. С ростом температуры и концентрации AlN в SiC теплопроводность уменьшается от 35 Вт/(м·К) при 300 К и 10 % AlN до 3 Вт/(м·К) при 1200 К и 90 % AlN. Уменьшение теплопроводности связано с наличием большего содержания кислорода в нитридалюминиевой фазе

и с рельефной структурой образцов, особенно при больших концентрациях AlN. ТКЛР увеличивается с ростом температуры и повышением содержания AlN в карбиде кремния до $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Тепловое сопротивление повышается с ростом содержания AlN в карбиде кремния. Значения ТКЛР и параметра Грюнайзена растут от SiC до AlN, что может указывать на повышение теплового сопротивления за счет фонон-фононного рассеяния. При высоких температурах тепловое сопротивление вызвано трех-фононным взаимодействием и может быть оценено формулой Лейбница-Шломаннса. Удельная теплоемкость составов увеличивается с ростом температуры и вблизи температуры Дебая переходит к насыщению.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ЦИРКОНИЙСОДЕРЖАЩИЕ БЕТОНЫ ВЫСШЕЙ ОГНЕУПОРНОСТИ

(✉)

E-mail: gala-shabanova@ukr.net

© Д. т. н. Г. Н. Шабанова¹ (✉), д. т. н. А. Н. Корогодская², к. т. н. В. К. Мокрицкая¹, к. т. н. Т. В. Школьникова²

¹ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей, г. Харьков, Украина

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра общей и неорганической химии, г. Харьков, Украина

Интенсификация технологических процессов в металлургии, энергетике, химии, промышленности строительных материалов, а также развитие новых отраслей техники требуют создания новых материалов и изделий из них, обладающих рядом специальных свойств. Одним из таких перспективных материалов является диоксид циркония, твердые растворы которого с оксидами элементов II и III групп Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева характеризуются высокой огнеупорностью и низкой теплопроводностью, а именно: преимущественно кислородо-ионной проводимостью в широком диапазоне температур и давлений кислорода.

На кафедре технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» исследовано субсолидусное строение многокомпонентных систем, в состав которых входит диоксид циркония. Это позволило разработать составы огнеупорных цементов, отличающихся высокой прочностью, ускоренными сроками схватывания, специальными свойствами: стойкостью к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений, агрессивных сред, давления, расплавов металлов и шлаков. Все это дает возможность предположить, что на основании разработанных вяжущих материалов при использовании соответствующих заполнителей могут быть получены бетоны высшей огнеупорности (>2000 °C). В качестве заполнителей для получения таких бетонов возможно использование ряда как природных, так и синтетических заполнителей: электроплавленного корунда, бадделеита, цирконата бария.

Разработанные составы бетонов испытывали в различных промышленных агрегатах.

► При использовании бетонов высшей огнеупорности в футеровке печей для плавки кварцевого стекла установлено, что по стойкости полученные материалы не уступают обожженным изделиям из стабилизированного оксида циркония, а по стоимости и простоте изготовления эти изделия намного экономичнее.

► При замене конструктивных элементов лабораторных криптоловых печей изделиями из разработанных бетонов производительность агрегатов повышалась в 1,5–2 раза.

► Результаты испытаний разработанных бетонов в условиях магнитогидродинамического генератора показали, что бетоны не претерпевают значительных изменений при одновременном воздействии скоростного газового потока (450–850 м/с), высокой температуры (2300–2500 °C), термического удара (подъем температуры до 2500 °C за 1 с) и щелочной среды и являются перспективными материалами для футеровки тепловых трактов МГД-установок.

► Металлопроводы для разлива стали под давлением, изготовленные из разработанных бетонов, не смачиваются металлом, не вступают во взаимодействие с расплавленным металлом, имеют высокие термостойкость и механическую прочность. Однако разработанные материалы неустойчивы к воздействию кислых шлаков.

► При испытаниях разработанных бетонов в футеровке агрегата по высокотемпературному пиролизу нефти в условиях одновременного воздействия высокой температуры (1800–2000 °C), перегретого водяного пара (до 4 МПа) и агрессивного воздействия

ароматических углеводородов установлено, что срок службы футеровки повышается более чем в 2 раза.

Таким образом, разработанные конструкционные материалы высшей огнеупорности являются перспективными при применении их в тепловых агрегатах химической, нефтехимической, электромагнитной

и других отраслях промышленности. Совокупность уникальных эксплуатационных характеристик и их полифункциональность позволяют отнести их к классу новых эффективных бетонов специального назначения и обеспечивают их конкурентоспособность на мировом уровне.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

(✉)
E-mail: shvt1@tut.by

ПРИНЦИПАЛЬНЫЙ ПОДХОД РАЗРАБОТКИ – ИССЛЕДОВАНИЯ – СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯТОРОВ РАЗНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© В. Т. Шмурадко¹(✉), д. т. н. Ф. И. Пантелеенко¹, В. И. Бородавко, д. т. н. О. П. Реут², Т. И. Бендик, А. Н. Кизимов, В. В. Клавкина

¹ Белорусский национальный технический университет (БНТУ), Минск, Республика Беларусь

² Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ», Минск, Республика Беларусь

Проанализированы принципиальный теоретический подход и его прикладные аспекты разработки – исследования – создания термостойких конструкционных электротехнических материалов-изделий разного функционального назначения из оксидных и бесокислородных химических соединений: электроизоляторов, диэлектриков, полупроводников. Фундаментальный логистический подход в создании электроизоляторов включает зонную теорию физики твердого тела; принципы формирования зонных структур, включающие группировку энергетических спектров электронов в энергетические спектры создаваемого твердого тела-материала, состоящие из зон валентности и проводимости (разрешенные зоны), разделенных энергетическим зазором, называемым «запретной зоной». Весь спектр свойств существующих и создаваемых материалов, согласно зонной теории и зонной структуре, позволяет классифицировать их по трем основным группам: металлические проводники, в которых валентная зона полностью заполнена электронами и перекрывается с зоной проводимости; полупроводники и диэлектрики, в которых зоны проводимости и зоны валентности разделены энергетическим зазором — запретной зоной, составляющей менее 3 эВ для полупроводников и 3–10 эВ для диэлектриков. Твердые тела, в которых разрешенные зоны не перекрываются (валентные полностью заполнены, а зоны проводимости пусты), относятся к диэлектрикам-электроизоляторам. Поскольку состояние и поведение физической системы, представляющей собой твердое тело, полностью определяются ее волновой функцией, то решение уравнений Шредингера и Хартри – Фока с учетом трех главных волновых приближений дает принципиальную возможность описать все свойства конкретного твердого тела (разрабатываемого материала): физико-механические и термомеханические, физико-химические и электрофизические, магнитные, оптические и другие, а также ответить на вопрос: почему совокупность определенных ядер и электронов образует кристаллическую решетку именно данного типа (сингонию).

При проектировании электроизоляторов обязательно учитываются внешние факторы, вызывающие или тепловой, или электрический механизмы пробоя. Тепловой пробой возникает у диэлектриков, работающих при повышенных температурах, и у диэлектриков с относительно большей проводимостью (10^{-6} – 10^{-11} См/м), работающих при комнатной температуре. Для материалов с уровнем проводимости порядка 10^{-6} – 10^{-11} См/м при повышенных температурах характерен тепловой пробой; материалы проводимостью 10^{-13} – 10^{-15} См/м разрабатывают для применения в условиях энергетически возможного электрического пробоя. Электрическая прочность разрабатываемых материалов на основе Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , AlN_4 , BN меняется в пределах 30–150 кВ/мм. Диэлектрики, изготовленные на основе $\alpha-Al_2O_3$, SiO_2 , ZrO_2 , $Al_2O_3 + 3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ и BN, имеют электрическую прочность 10, 28, 40, 16, 21 и 100 кВ/мм соответственно. Разработанные материалы применяли для изготовления полых кольцевых диэлектриков (со сложной геометрией стенки) для электротехнического оборудования электронно-лучевой сварки в вакууме толстостенных конструкций из алюминиевых сплавов, а также в качестве вакуум-плотных электроизоляторов, работающих в вакуумных печах при высоких температурах (> 1000 °С) в химически активных восстановительных газовых средах.

Реализация фундаментальных, прикладных и экспериментально-теоретических аспектов исследования с учетом положений зонной (волновой) теории и зонной структуры создаваемых материалов формирует условия, подходы и решения для проектирования керамических материалов-изделий конструкционного, функционального, керамо-огнеупорного назначения и, в частности, материалов-изделий для вакуумной электротехники: электроизоляторов для электронно-лучевой сварки в вакууме конструкций из алюминиевых сплавов; вакуум-плотных электроизоляторов для вакуумных печей газотермического упрочнения бурового инструмента в диссоциированном ацетилене при 1050 °С; корпусов свечей зажигания разного технического назначения и др.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ✉
E-mail: tambovbest@yahoo.com**КОМПОЗИЦИОННАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ,
ОБЛАДАЮЩАЯ ЗАПАСОМ ПЛАСТИЧНОСТИ И СТОЙКОСТЬЮ
К НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕГРАДАЦИИ**© К. ф.-м. н. **А. В. Шуклинов** ✉, д. ф.-м. н. **А. А. Дмитриевский**, к. ф.-м. н. **Д. Г. Жигачева**,
В. М. Васюков, **А. О. Жигачев**, **Т. А. Дьячек**, к. ф.-м. н. **Н. Ю. Ефремова**, **П. Н. Овчинников**
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия

Уникальный комплекс свойств циркониевой керамики, упрочненной оксидом алюминия (ATZ), обеспечивает широкую область ее практического применения. В ATZ-керамике сильные стороны ZrO_2 сочетаются с достоинствами Al_2O_3 . Однако подавляющее большинство разработанных на сегодняшний день составов ATZ-керамики имеют два значительных недостатка — хрупкость (< 500 °С) и деградация механических свойств под действием влаги. Разработка новых составов (замена традиционного стабилизатора тетрагональной фазы $t-ZrO_2$ и введение дополнительных компонентов), а также дизайн границ зерен (кристаллитов) ATZ-керамики может способствовать преодолению (по крайней мере, частичному) этих недостатков. Это значительно расширит область ее применения. В этой связи настоящая работа направлена на разработку состава ATZ-керамики, проявляющей способность к пластической деформации при комнатной температуре и обладающей повышенной стойкостью к гидротермальным воздействиям.

Для повышения стойкости ATZ-керамики к низкотемпературной деградации вместо Y_2O_3 (традиционно используемый стабилизатор $t-ZrO_2$) был использован CaO. Для улучшения спекаемости и тетрагонально-моноклинной трансформируемости в состав CaO-ATZ-керамики вводили третий компонент — SiO_2 (Дмитриевский, А. А. [и др.] // ЖТФ. — 2020. — Т. 90, № 12. — С. 2108–2117). Показано, что керамика разработанных составов CaO-ATZ и CaO-ATZ + SiO_2 превосходят мировые аналоги (циркониевую керамику, стабилизированную Y_2O_3 , и ее композиты с Al_2O_3) по стойкости к низкотемпературной деградации (при давлении 2 ат, температуре 134 °С, влажности 100 %). Обнаружено, что введение 4–5 мол. % SiO_2 в CaO-ATZ-керамику обеспечивает проявление признаков пластичности при комнатной температуре — появление площадки те-

кучести на диаграммах одноосного сжатия. Показано, что относительная деформация достигает 1,5 %. Предел прочности при сжатии при этом не ниже 2,25 ГПа. Анализ СЭМ-снимков не обнаружил изменений микроструктуры образцов CaO-ATZ + SiO_2 -керамики, вызванных деформацией. По рентгенограммам установлено, что в деформированных кремнийсодержащих образцах наблюдается уменьшение относительной доли $t-ZrO_2$. Таким образом, наблюдаемая пластичность CaO-ATZ + SiO_2 -керамики не связана с зернограничным скольжением (основным механизмом массопереноса при высокотемпературной деформации мелкозернистых материалов), а обусловлена тетрагонально-моноклинными фазовыми превращениями. Это согласуется с результатами анализа четырехточечного изгиба композиционной керамики $CeO_2-ZrO_2 + Al_2O_3 + SrAl_{12}O_{19}$ (Chevalier, J. [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. — 2020. — Vol. 103. — P. 1482–1513).

Обеспечение запаса пластичности и достигнутое повышение стойкости ATZ-керамики к низкотемпературной деградации в комплексе с высокими показателями механических свойств (твердость $H = (10,9 \pm 0,5)$ ГПа, вязкость разрушения $K_{Ic} = (12,43 \pm 0,35)$ МПа·м^{0,5}, пределы прочности при изгибе $\sigma_f = (530 \pm 30)$ МПа и сжатии $\sigma_c = (2,44 \pm 0,15)$ ГПа) открывает новые возможности для практического применения CaO-ATZ + SiO_2 -керамики. Она может быть использована в качестве материала для изделий, подверженных длительному воздействию влаги и вынужденным деформациям в процессе эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-00068. Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г. Р. Державина.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ✉
E-mail: tyarushina@magnezit.com**ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ СВОДА ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПЕЧИ**© К. т. н. **Т. В. Ярушина** ✉, к. т. н. **М. Ю. Турчин**, **М. А. Ерошин**
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Огнеупоры футеровки свода ферросплавной печи в условиях длительной выдержки при высоких температурах (порядка 1900–2100 °С), резких колебаний температур и воздействия резко различающейся по окислительно-восстановительной способности газовой среды в разные периоды плавки подвержены воздействию частиц плавильной пыли. Кроме оксидов железа в плавильной пыли содержатся оксиды легирующих элементов (кремния, марганца, хрома и

др.), зачастую резко интенсифицирующие изменение химико-минерального состава изделий и снижающие их огнеупорность. Образующиеся в процессе восстановительной плавки газы содержат около 85 % CO и являются высокотоксичными и взрывоопасными. Для предупреждения взрыва из-за подсоса воздуха плавку проводят, поддерживая под сводом положительное давление, составляющее примерно 4,9 Па (0,5 мм вод. ст.). Свод ферросплавной печи в условиях воздействия тя-

желейших факторов износа должен обеспечивать полную герметизацию подсводового пространства. Для футеровки свода ферросплавной печи в ТНК «Казхром» обычно используют корундомуллитовые огнеупоры зарубежных производителей. Массовая доля Al_2O_3 в огнеупорах составляет около 90 мас. %. Изделия характеризуются высокой термостойкостью, стойкостью к истиранию и воздействию CO. Из-за сложных условий эксплуатации при заметном градиенте температур на рабочей поверхности, в том числе и из-за наличия большого количества технологических отверстий (для электродов и загрузочных воронок, газоотводов к газоочистке, взрывных клапанов и др.), износ футеровки свода на разных участках, как правило, неодинаков.

В рамках Программы сотрудничества с ТНК «Казхром» специалисты Технического управления Группы «Магнезит» провели исследования по выбору наиболее устойчивого к факторам износа огнеупора. Исследование выбранных огнеупоров к воздействию шлака Актюбинского завода ферросплавов проводили в лабораторной вращающейся печи. По результатам теста наиболее высокую устойчивость проявили изделия марки DALMACR 50S25, открытая пористость которых не превышала 6,2 %. Анализ под микроскопом показал, что изделия не подвержены коррозионным процессам и лишь незначительно пропитываются компонентами шлака — содержание оксида кремния

в глубине огнеупора достигает исходного уровня на расстоянии 10–15 мм от поверхности. Испытания на устойчивость к воздействию восстановительной газовой среды при 1000 °С в течение 3 ч также показали положительный результат. По визуальной оценке изделия не претерпели никаких изменений, анализ под микроскопом не выявил изменений микроструктуры, однако предел прочности при изгибе изделий существенно увеличился и при 1200 °С составил 25,8 Н/мм². Изделия были рекомендованы ТНК «Казхром» для испытания в своде ферросплавной печи в качестве альтернативы высокоглиноземистым огнеупорам зарубежных производителей.

Для сравнительной оценки стойкости изделия марки DALMACR 50S25 были установлены рядом с серийно используемыми высокоглиноземистыми огнеупорами на двух участках свода печи: в районе газохода со стороны первой шлаковой летки и в районе второго взрывного клапана со стороны второй шлаковой летки. Испытания показали, что на участке района газохода стойкость изделий марки DALMACR 50S25 выше, чем у серийных (износ серийных корундомуллитовых изделий составил 34 % от первоначальной толщины). Кроме того, опытные изделия на этом участке практически не изнашиваются, а в районе второго взрывного клапана находятся на одном и том же уровне.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛАСТИЧНОСТИ КОКСОВОЙ СТРУКТУРЫ ОГНЕУПОРОВ СОСТАВА MgO–C

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

© К. т. н. **Т. В. Ярушина** (✉), к. т. н. **М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин**
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

Служебные свойства оксидоуглеродистых изделий находятся в прямой зависимости от структуры и свойств коксового каркаса, образующегося при карбонизации фенолоформальдегидного связующего с минеральным наполнителем. Формирование коксовой структуры основано в первую очередь на адгезии полимеров к поверхности наполнителя и находится в тесной зависимости от содержания в них функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных, полиамидных или нитрогрупп). Решающее влияние на адгезионную прочность фенолоформальдегидных смол к поверхности твердых тел оказывают гидроксильные группы, обеспечивающие, в том числе, ее смачивание.

Для всех исследованных твердых поверхностей общим является тот факт, что эти поверхности покрыты слоем кислорода в основном за счет адсорбции либо окисления. Адсорбция кислорода на графите на воздухе при комнатной температуре и выше неоднократно подтверждалась экспериментально. Смачиваемость и адгезия в оксидоуглеродистых системах должны, очевидно, определяться установлением связей между кислородом твердой поверхности и гидроксильными группами смолы. Потеря ги-

дроксильных групп при деструкции смолы приводит к ухудшению смачиваемости.

Снижение прочности углеродистого каркаса при карбонизации и разрыхление его структуры обусловлено окислением углеродистого полимера кислородом, адсорбированным поверхностью, а также продуктами дегазации и декарбонизации наполнителя. Для снижения доли кислорода, адсорбированного поверхностью наполнителя, матрицу огнеупора обработали в установке активации процессов во вращающемся электромагнитном поле и с ее использованием были изготовлены на промышленном прессе HPF-IV-2000 модельные (в форме кирпича нормального размера 230×115×65 мм) образцы периклазоуглеродистых изделий с содержанием углерода 2 и 10 %. Опыт показал, что в обоих случаях использование обработанной во вращающемся электромагнитном поле матрицы значительно повлияло на важнейшие физико-технические свойства изделий как после термообработки, так и после коксования при 1000 °С. Предел прочности при сжатии низкоуглеродистых образцов после термообработки увеличился от 58,9 до 74,0 Н/мм², при изгибе на холоде — от 16,3 до 19,7 Н/мм². Предел прочности при сжатии

образцов с содержанием углерода 10 % после термообработки увеличился от 44,3 до 50,0 Н/мм². После коксования физико-технические свойства образцов также изменились: увеличилась высокотемпературная прочность при изгибе в диапазоне от 20 до 1400 °С, причем с тенденцией повышения с ростом температуры; снизились показатели относительного удлинения и ТКЛР в диапазоне 20–1500 °С.

Обработка матричной части шихты во вращающемся электромагнитном поле улучшает адгезию

фенолоформальдегидной смолы к ее поверхности, что позитивно влияет на прочность и специфическую эластичность коксовой структуры огнеупоров состава MgO–C как с ультранизким содержанием углерода (2 %), так и с содержанием углерода 10 %. При значительном повышении предела прочности при сжатии и изгибе после термообработки и коксования при 1000 °С наблюдается эффект снижения относительного удлинения и ТКЛР, а следовательно, термостойкость и коррозионная стойкость изделий возрастают.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКИ

ЗАВИСИМОСТЬ СТОЙКОСТИ MgO–C-ОГНЕУПОРОВ ШЛАКОВОГО ПОЯСА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ ОТ КОЛИЧЕСТВА РАСКИСЛЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ ФЕРРОМАРГАНЦА

(✉)

E-mail: tyarushina@magnezit.com

© К. т. н. Т. В. Ярушина (✉), к. т. н. М. Ю. Турчин, М. А. Ерошин, А. О. Мигашкин
ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

При любом способе производства стали (конвертерном, электросталеплавильном или мартеновском) в процессе плавки при выгорании примесей шихты происходит постепенное повышение содержания кислорода в жидком металле. В конце окислительного периода плавки оно определяется преимущественно концентрацией углерода: максимальное содержание кислорода достигается при низком содержании углерода. Задача операции раскисления жидкого металла — снижение концентрации в нем растворенного кислорода и, по возможности, полное удаление продуктов раскисления. Оставшийся в металле в неактивной форме кислород в гораздо меньшей степени ухудшает свойства готовой стали.

Наиболее распространен способ осаждающего раскисления, при котором снижение концентрации растворенного в жидком металле кислорода достигается связыванием его элементами-раскислителями (Mn, Si, Ti, Zr, Al, Ca и др.), обладающими большим сродством к кислороду, чем железо. Находясь в расплавленном металле, раскислители легче вступают в химические соединения с кислородом, благодаря чему отбирают кислород от оксидов железа и будучи нерастворимыми в стали, или обладая ограниченной растворимостью, в виде оксидов всплывают на поверхность ванны, присоединяясь к шлаку. Большинство раскислителей (например, марганец, кремний и титан) вводят не в чистом виде, а в виде сплавов с железом — ферросплавов. Алюминий применяется в виде металлического порошка, ферроалюминия или в составе комплексных сплавов, содержащих несколько элементов раскислителей, например в сочетании с кремнием, кальцием и др. Наиболее дешевым и чаще всего применяемым раскислителем является ферромарганец.

Устойчивость периклазоуглеродистых (ПУ) изделий к воздействию ферромарганца определяли статическим (тигельным) методом по глубине и площади пропитки в процессе высокотемпературного обжига при 1650 °С в восстановительной среде. Опыт показал, что механизм взаимодействия огнеупора с корроди-

ентом заключается в проникновении расплава в слой огнеупора на глубину около 1,5 мм и взаимодействии его с графитом и периклазом. В зоне пропитки повсеместно присутствовали включения ферромарганца, а также марганецсодержащие монтичеллит и форстерит. По данным микрзондового анализа РЭМ, степень насыщения периклаза ионами марганца в пересчете на MnO составила до 5 %. Графит в зоне пропитки отсутствовал.

В результате мониторинга службы ПУ-изделий производства Группы «Магнезит» в течение года на одном из предприятий черной металлургии, применяющем для раскисления стали соединения марганца (ферромарганец, ферросиликомарганец, марганец металлический), установлено, что существует зависимость стойкости MgO–C-огнеупоров шлакового пояса сталеразливочных ковшей от количества раскисляющей добавки. Так, при прочих равных условиях увеличение количества добавки марганца в 1,1 раза от номинала приводит к снижению стойкости футеровки на 10–11 %, при увеличении количества добавки в 1,2 раза — на 16–17 %. Увеличение количества добавки марганца в 1,4 раза приводит к снижению стойкости футеровки на 18–20 %.

При применении в качестве раскислителя стали ферромарганца кристаллы MgO матрицы огнеупора поглощают оксиды железа и марганца из жидкой фазы шлака с образованием твердого раствора типа (Mg·Fe·Mn)O. При этом они увеличиваются в размерах и легко вымываются в шлак. Коррозии подвержены также частицы углеродной составляющей изделий, в первую очередь коксовой структуры, по схеме: $(Fe)MnO + C \rightleftharpoons (Fe)Mn + CO$.

Футеровка сталеразливочных ковшей на данном предприятии подвергается воздействию агрессивного шлака весьма переменного состава. Известно, что если первоначальная композиция шлака не насыщена MgO, то футеровка из ПУ-изделий подвергается интенсивной коррозии в результате растворения MgO. Используя эмпирические модели Шурмана и Колма, Парка и

Ли, Квонга и диаграммы Преториуса – Карлайла, рассчитали концентрацию V_i насыщения шлака MgO — соотношение между огнеупорными оксидами CaO и MgO и флюсующими оксидами Al_2O_3 , SiO_2 , FeO , MnO . Расчеты показали, что даже без добавки раскислителей коррозионный потенциал шлака на предприятии довольно высок: B_2 составляет около 3,23, B_3 2,13, B_4 2,23, B_5 2,22. При добавлении раскислителя-ферромарганца коррозионный потенциал шлака существенно возрастает: B_2 снижается до 1,66–2,11, B_3 до 1,12–1,25, B_4 до 1,46–1,57, B_5 до 0,76–0,98. Усугубляющим факто-

ром коррозионного износа является попадание шлака в сталеразливочный ковш при выпуске металла из сталеплавильного агрегата. Эти шлаки характеризуются довольно высоким содержанием FeO и MnO , а также затрудняют наведение высокоосновного шлака в агрегате ковш-печь.

Минимизация коррозионного потенциала шлака и увеличение срока службы MgO - C -огнеупоров возможны за счет снижения доли раскислителей стали до номинала и добавления в расплав необходимого количества MgO или CaO .

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

МОНОЛИТНАЯ ФУТЕРОВКА ГОРНА ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ИЗ БЕСЦЕМЕНТНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНОВ МАРКИ METRUMP® КОМПАНИИ MAGNESCO/METREL

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

✉
egoncharov@magnesco-metrel.com

© Э. В. Гончаров ✉
Компания Magnesco/Metrel, Inc., Эддисон, Иллинойс, США

Альтернативой традиционной футеровке доменных печей (ДП) из углеродистых блоков является монолитная футеровка горна из бесцементных бетонов марки Metrump. Подтверждено на практике, что такая футеровка с исключительными эксплуатационными характеристиками обладает более продолжительным сроком службы, чем традиционная перефутеровка углеродистыми блоками, обеспечивает экономию капитальных затрат (на материалы и монтаж) и значительно сокращает простои ДП. Бесцементные огнеупорные бетоны марки Metrump на коллоидно-кремнеземистой (золь-гель) связке устойчивы ко всем видам механизмов химического износа углеродистых изделий, включая микро-, супермикро- и ультрасупермикропористые. Ниже приведены проблемы перерождения и износа футеровки горна ДП из углеродистых блоков и из бетона марки Metrump.



Таким образом, монолитная футеровка Metrump для горна ДП устойчива к воздействию жидкого чугуна и шлака и является идеальной заменой традиционной футеровки из углеродистых блоков.

Футеровка из углеродистых блоков	Футеровка бетоном Metrump
<ul style="list-style-type: none"> • Требуется охлаждения до температуры ниже 400 °C для устранения потерь от окисления углерода и образования в футеровке «кротовых дыр» • Требуется охлаждения (ниже 600 °C) для устранения воздействия CO и разрушения углеродной структуры («разбухание» и потеря теплопроводности) • Требуется охлаждения (ниже 800 °C) для устранения воздействия щелочей и цинка • Требуется охлаждения (ниже 1150 °C) для устранения потерь от растворения при воздействии на углерод ненасыщенного жидкого чугуна • Хрупкие микро- и супермикропористые огнеупоры склонны к растрескиванию, что может привести к проникновению жидкого чугуна и прорыву горна. Кроме того, межблочные стыки в футеровке стен горна могут создавать зазоры между горячей и холодной поверхностями футеровки • Футеровка стен горна толщиной примерно более 800 мм не может эффективно охлаждаться из-за отсутствия необходимой компенсации дифференциального теплового расширения 	<ul style="list-style-type: none"> • Не требует охлаждения вплоть до максимальной рабочей температуры 1700 °C • Не подвергается воздействию CO и перерождению • Не требует охлаждения вплоть до максимальной температуры 1700 °C • Не подвергается износу при прямом контакте с жидким чугуном • Обладает небольшим тепловым расширением при нагреве, поэтому любые усадочные трещины остаются плотно закрытыми при достижении рабочей температуры. Кроме того, может пластично деформироваться, приспособившись к любому тепловому расширению • Толщина футеровки подобрана таким образом, чтобы при достижении теплового равновесия на ее горячей поверхности формировался защитный слой гарнисажа

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВКИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА СЕВЕРСКОМ ТРУБНОМ ЗАВОДЕ



E-mail: ZhilinAM@stw.ru

© К. э. н. М. В. Зуев¹, к. т. н. А. В. Мурзин¹, Л. В. Зубаков¹, А. М. Жилин¹ (✉), Р. Н. Булатов²¹ АО «Северский трубный завод», г. Полевской Свердловской обл., Россия² RHI Magnesita, Вена, Австрия

Результаты эксплуатации ДСП-135 в период 2008–2021 гг. В 2008 г. на Северском трубном заводе (СТЗ), входящем в состав ПАО ТМК, была введена в эксплуатацию дуговая сталеплавильная печь ДСП-135. Проектирование и поставку основного оборудования печи осуществляла компания SMS Demag, Германия. Основные технические характеристики ДСП-135: номинальная вместимость по выпуску 135 т (+25 т «болото»), мощность трансформатора 110 МВ·А, выпуск эркерный.

После запуска ДСП в октябре 2008 г. ее начальная стойкость составила 381 плавку, центральной части свода 100–200 плавков, комплекта огнеупоров для эркерного отверстия 60 плавков. Применение качественных огнеупоров, использование современных технологий обслуживания футеровки и внедрение автоматизации управления технологическим процессом выплавки обеспечили планомерный рост стойкости всех элементов футеровки ДСП. К настоящему моменту установлен рекорд стойкости футеровки стен — 2502 плавки (127 сут), стойкость центральной части свода достигла 1100–1200 плавков, огнеупоров для эркерного отверстия 200 плавков.

Основные положения стабилизации стойкости огнеупоров футеровки ДСП-135. Дизайн футеровки ДСП-135 разработан совместно с техническими представителями фирмы RHI AG. В качестве набивного материала подины применяется масса марки Ankerharth NN25, в качестве формованных изделий — изделия марки Anscarbon на синтетической углеродистой связке, для формирования откосов — набивная масса Ankerharth SB25, которая позволяет выводить острый откос. Набивной массой Ankermix выполняется защита медных холодильников под горелками. При эксплуатации печи использованы известные приемы горячего ремонта футеровки: подача огнеупорных материалов к месту локального ремонта подины мешками и лотками, ремонт откосов лотками, заправка откосов и шлакового пояса бросковой машиной, торкретирование. Для заправки печи применена заправочная масса марки Ankerfrit, обеспечивающая надежное спекание с материалом подины, для торкретирования — роботизированный торкрет-манипулятор с применением торкрет-массы Ankerjet.

Для защиты огнеупоров стен печи и формирования гарнисажа особое внимание уделяется поддержанию оптимального состояния откосов и химического состава конечного печного шлака. Для снижения агрессивного воздействия шлака на огнеупоры производится насыщение начальных шлаков MgO путем введения магнезиальных добавок типа Магма (магнезиальный флюс) предприятия «Северский огнеупор» с расходом 8–9 кг/т стали. Это обеспечивает концентрацию MgO в конечном шлаке в диапазоне 8–10 %.

Основные технико-технологические решения, направленные на дальнейшее повышение стойкости огнеупоров футеровки ДСП-135. Применение высококачественных огнеупоров, контроль горячего ремонта и ухода за футеровкой позволили не только повысить стойкость футеровки печи от 381 до 1952 плавки (в 2019 г.), но и создать основу для внедрения современных технологических подходов и технических решений, повысив тем самым эффективность технологического процесса выплавки в целом.

- В 2020 г. на печь были установлены новый регулятор позиционирования электродов MeltExpert компании Primetals Technologies Germany, GmbH, а также система автоматического вдувания углерода (угольной пыли) в печь для наведения вспененного шлака (FSM). Отличительные характеристики регулятора — его быстрое действие и приспособляемость под условия ведения плавки. С учетом показаний электрической цепи в автоматическом режиме происходит управление подъемным устройством каждого из электродов в процессе плавки, что позволяет обеспечить оптимальную длину дуги и, соответственно, снизить удельный расход электроэнергии и время под током, а также негативное влияние на огнеупорные изделия.

- Во второй половине 2020 г. проведена замена на трех газокислородных горелок и инжекторов на устройства нового типа, дизайн которых был разработан совместно с НТП АКОНТ. Новые устройства представляют собой модульные газокислородные горелки, объединенные с инжектором в общем кессоне. Преимущество модульных устройств — возможность вдувания угольной пыли непосредственно в реакционную зону. Горелки выполнены по типу «труба в трубе»: во внешние трубы подается газ и кислород на горение, во внутреннюю — технологический кислород. Кислород расходуется на окислительные реакции. Расход кислорода на горение газа и на «копье» регулируется независимо, что позволяет настроить оптимальный расход кислорода для протекания окислительной реакции с угольной пылью, вдуваемой через инжектор непосредственно в реакционную зону. Этим достигаются ускорение наведения вспененного шлака и экранирование излучения дуг. Вспенивание шлака и поддержание его во вспененном состоянии происходит в полуавтоматическом режиме с помощью специальной программы управления. Управление расходом угля происходит на основе расчета индекса вспененности, который непрерывно рассчитывается и прогнозируется программой, исходя из гармоник токового сигнала. Коррекция индекса вспененности производится изменением расхода угольной пыли на каждой линии вду-

вания с помощью регулировки положения задвижек, установленных в газопроводе вдувания угля.

• Внедрение автоматизации позволило разработать и применить новый эффективный газокислородный режим, учитывающий изменения плотности кислорода и газа при сезонном изменении температуры окружающей среды.

В результате внедрения комплекса технико-технических мероприятий достигнута рекордная стойкость футеровки стен ДСП, а также сокращены количество ремонтов для замены подины от 4 до 3 в год, время плавки под током на 2,8 %, удельный расход электроэнергии на 2,0 % и угля в печь на 22 % при сохранении окисленности на требуемом уровне.

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

(✉)

E-mail: dmitriy.ryabyi@gir.ua

РАЗРАБОТКА МАГНЕЗИАЛЬНОЙ САМОРАСТЕКАЮЩЕЙСЯ МАССЫ GIR-RB-X ДЛЯ ГОРЯЧЕГО РЕМОНТА ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРА

© Г. Г. Немсадзе¹, Р. А. Джоджуа¹, д. т. н. А. Н. Смирнов², Д. В. Рябый^{2,3}(✉), К. Н. Шарандин³

¹ ПАО «ЗНВКИФ» «General Investment Resources», Киев, Украина

² Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН, Киев, Украина

³ «GIR-Engineering», Ltd, г. Днепр, Украина

Наиболее перспективной альтернативой торкретированию и раздувке шлака азотом, не требующей специального оборудования и подготовки персонала, является подварка саморастекающимися магнезиальными массами. Горячий ремонт футеровки методом подварки выполняется следующим образом: после слива продуктов плавки конвертер кантуется в сторону слива или завалки в зависимости от зоны износа. Подварочная масса забрасывается на ремонтируемый участок вручную либо из ломозавалочного совка. За счет своих «текучих» свойств в температурном интервале спекания масса равномерно заполняет зону износа. После выдержки (10–20 мин) материал спекается в прочный огнеупорный конгломерат и приваривается к футеровке с образованием так называемой «латки» – подварки.

На основании доступной отечественной сырьевой базы специалистами компании «GIR-Engineering» разработана рецептура саморастекающейся подварочной, магнезиальной массы марки GIR-RB-X. Основными качественными показателями разработанной массы GIR-RB-X являются:

– гранулометрический состав, подобранный таким образом, чтобы обеспечить максимально плотную укладку зерновой составляющей после спекания;

– химический состав; содержание MgO 75–85 мас. % (на прокаленное вещество) для обеспечения максимальной эрозионной и коррозионной стойкости после спекания;

– смесь органических и неорганических смол, кислот и солей для обеспечения жидкоподвижности массы в заданном интервале температур, регулирования времени спекания массы и придания ей заданной механической прочности.

Для проверки и оптимизации физико-химических свойств подварочной массы была разработана методика оценки с применением печи роторного типа, включающая три основных этапа: подготовку огнеупорных образцов для подварки; заполнение ремонтной массой зоны опережающего износа; испытание эрозионной и коррозионной стойкости.

После качественной оценки поведения подварочной массы, степени ее адгезии к периклазоуглеродистому огнеупору, длительности спекания и коррозионно-эрозионной устойчивости массы печь охлаждали до комнатной температуры, проводили демонтаж футеровки и отбирали пробу навески спеченной массы с поверхности огнеупора. На подготовленных образцах подварки — конгломерата на лабораторном прессе измеряли предел прочности при сжатии, который составил 38,5 МПа, что удовлетворяет производственным требованиям. На основании полученных экспериментальных результатов на производственной площадке компании «GIR-Engineering» на линии по производству сухих смесей, включающей шнековую систему подачи и автоматического дозирования Siemens, а также смесители фирмы Eirich, было организовано серийное производство подварочной массы.

Подварочная масса внедрена на нескольких предприятиях:

• На ДМК проведены испытания массы в 250-т конвертерах. По результатам проведенных испытаний подварочная масса обеспечила удельный расход на уровне 0,089 кг/т при нормативном расходе 0,092 кг/т. Масса рекомендована к использованию в условиях ПАО ДМК и поставляется на базовой основе;

• В конвертерном цехе МК «Азовсталь» проведены испытания массы в 350-т конвертерах. Стойкость подварочного слоя составила 30 плавков. Масса марки GIR-RB-X рекомендована к использованию в условиях МК «Азовсталь» на базовой основе;

• В конвертерном цехе ММКИ проведены испытания на 160-т конвертерах. Стойкость подварочного слоя составила 14 плавков (при требуемых 8 плавках).

На сегодняшний день компания «GIR-Engineering» располагает возможностями серийного производства и поставок подварочной массы марки GIR-RB-X в количестве 80–100 т в месяц. Развитая транспортная сеть обеспечивает доставку продукции на все предприятия горно-металлургического комплекса Украины с кислородно-конвертерным производством, а также в страны ближнего зарубежья.



E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

© К. т. н. **В. В. Словиковский, А. В. Гуляева**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

Разработаны конструкции стен и сводов агрегатов цветной металлургии, работающих в наиболее тяжелых условиях. Предложено устанавливать в кладку водоохлаждаемых медных кессонов в виде глиссажных труб. Испытания футеровки на Алмалыкском металлургическом комбинате (г. Алмалык, Узбекистан) в агрегате кислородно-факельной плавки, на Кировградском медеплавильном заводе (г. Кировград) показали увеличение стойкости футеровки в 1,8–2,0 раза. Для увеличения стойкости свода и стен в районе шлакового пояса установлены водоохлаждаемые глиссажные трубы, выполненные из меди, размерами 65×65 мм и диаметром внутреннего отверстия 30 мм. Глиссажные трубы обеспечивают высокую стойкость элементов футеровки, а также дают возможность использовать тепло охлаждаемой воды.

Сущность испарительного охлаждения состоит в использовании скрытой теплоты парообразования для отвода тепла от охлаждаемых элементов печей и в замене охлаждающей холодной воды кипящей, коэф-

фициент теплопередачи которой значительно выше, чем холодной. Тепло, отбираемое охлаждающей водой, затрачивается на ее испарение. Применение испарительного охлаждения для защиты футеровки является перспективным, использование глиссажных труб безопасно при их повреждении, так как объем воды или пара в них небольшой. Глиссажные трубы уменьшают потери тепла через свод. Их применение позволяет обеспечить фактически неограниченную стойкость огнеупора, а также снизить общую температуру сводов и, следовательно, замедлить процесс взаимодействия футеровки с продуктами возгонов, уменьшить проникновение газов в поры огнеупора. Кроме того, происходят меньше разрушение и скалывание огнеупора. Применение глиссажных труб повышает стойкость футеровки в 2–2,5 раз. Авторами предложено использовать глиссажные трубы, понижающие температуру службы кладки, в сводах и стенах РТП, в печах кислородно-факельной плавки, мартеновских печах.

