

К. Т. Н. К. Б. Подболотов, К. Т. Н. Е. М. Дятлова, К. Т. Н. Р. Ю. Попов

Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

УДК 666.76:54.057

КЕРАМИЧЕСКИЕ ОГНЕУПОРНЫЕ СВС-ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-SiO_2

Проведены исследования по получению методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) огнеупорных покрытий на основе системы Al-SiO_2 на алюмосиликатных огнеупорах с применением кварцевого песка и каолинов Республики Беларусь. Установлено, что использование смесей каолина и кварцевого песка снижает вероятность образования трещин в покрытии при сушке и обжиге и улучшает его качественные характеристики. Показано, что огнеупорность покрытия выше 1300°C достигается только при применении связующих, не содержащих солей натрия. Исследованы физико-химические и термические свойства синтезированных керамических СВС-материалов и покрытий на их основе. Установлено влияние добавок на вышеуказанные характеристики. Высокую адгезионную прочность проявляют покрытия, содержащие добавки диоксида титана и борной кислоты.

Ключевые слова: СВС-покрытия, экзотермический синтез, связующее, огнеупорность, термостойкость, муллит.

ВВЕДЕНИЕ

Из большого количества используемых в настоящее время огнеупорных материалов наиболее распространенными являются алюмосиликатные с массовым содержанием муллита 61–72 % [1–3]. Существует возможность получения огнеупоров таких составов в режиме СВС. Это явление, открытое в 1967 г., получило распространение вследствие экономии энергии при синтезе ценных продуктов в режиме твердопламенного горения [4–8].

Известно применение СВС для получения мертелей, а также разнообразных мастик, обмазок и других подобных материалов, которые используются при изготовлении футеровок печей в качестве мертельного раствора или для герметизации и защиты футеровки печей от воздействия газов, пыли, резких перепадов температур и др.

С практической точки зрения для получения разнообразных материалов строительного назначения (футеровочные материалы, огнеупоры, легкие ячеистые бетоны, тепло- и огнезащитные материалы) особое предпочтение имеют СВС-системы, содержащие диоксид кремния SiO_2 , поскольку этот компонент составляет основу большинства природных материалов и отходов стройиндустрии [9–11].

Заслуживают внимания исследования В. М. Мальцева и др. [12, 13], разработавших материал, содержащий муллит состава $X\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot Y\text{SiO}_2$, где $X = 0,68 \div 0,70$ и $Y = 0,33$. Материал получен экзотермическим синтезом исходной шихты, содержащей 70–80 % диоксида кремния, 20–30 % алюминия и 35 %-ный раствор жидкого стекла в количестве 16–18 % от массы шихты. При этом

исходная смесь может дополнительно содержать 10–40 % карбида кремния. В качестве кремнийсодержащего компонента в исходной смеси используют песок марки С-070-1, содержащий 98,3 % SiO_2 , являющийся окислителем системы, а в качестве восстанавливающего агента — порошкообразный металлический алюминий марки АСД-1.

Основными компонентами СВС-мертелей в зависимости от типа могут быть порошок металлического алюминия, алюмосиликатный (муллитокорундовый) наполнитель, кремнезем, периклаз, хромитовый концентрат и различные модифицирующие добавки. Практическое применение СВС-мертелей аналогично применению мертелей, полученных по традиционным технологиям. После приготовления исходной смеси ее наносят на штучные огнеупорные изделия слоем толщиной 3–5 мм при возведении футеровки печи и сушат в течение 1 ч. Нагрев футеровки и швов обычно осуществляется за счет подачи расплавленного металла или раскаленных газов. При разогреве футеровки до $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ шов воспламеняется и горит со скоростью 1 мм/с, при этом температура в зоне горения достигает $1500\text{--}1900^\circ\text{C}$ [14–17].

После завершения стадии горения шов практически сразу набирает требуемую прочность. СВС-мертели по адгезионной прочности значительно (в 3–4 раза) превосходят традиционно полученные. Этот эффект обусловлен тем, что в ходе СВС из-за развития в зоне горения высокой температуры происходит не только синтез огнеупорного материала шва, но и одновременно взаимодействие компонентов шихты с материалом изделия с образованием прочной связи.

Особый интерес для практического использования применительно к наиболее распространенным в промышленности алюмосиликатным огнеупорам представляют покрытия, полученные на основе системы Al-SiO₂ по СВС-технологии. Нанесение на поверхность огнеупоров покрытий расширяет область температурного применения огнеупорной основы, приводит к значительному уменьшению физико-химической коррозии и механической эрозии поверхности, повышает температурный ресурс огнеупоров в условиях статических и динамических (в том числе циклических) воздействий агрессивных сред и высокотемпературных газовых и пылевых потоков. Весьма перспективным представляется применение СВС-покрытий для защиты футеровки печей для плавки черных и цветных металлов (особенно сплавов алюминия) и соляных ванн для обработки инструментальных сталей.

Покрытия образуются на поверхности шамотных огнеупоров в процессе инициирования реакции СВС в обычном режиме эксплуатации тепловых агрегатов при 700–850 °С. Толщина огнеупорного покрытия может быть различной (от 0,5 до 4 мм) в зависимости от производственной необходимости. Полученные в исследуемой системе покрытия, в зависимости от состава исходной шихты и добавок, могут состоять из муллита, оксида алюминия, карбидов, алюминатов и силикатов. Рациональное сочетание исходных компонентов и добавок дает возможность получать композиционные покрытия с требуемыми характеристиками.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения покрытий методом СВС в качестве основных исходных компонентов в работе использовали техногенное сырье — алюминиевую пудру и природное — кварцевый песок и каолины месторождений Ситница и Дедовка Республики Беларусь.

Алюминиевая пудра (ГОСТ 5494) имеет серебристо-серый цвет и визуально не содержит инородных примесей. Ее получают помолом первичного алюминия в шаровой мельнице. Частицы алюминия в пудре по форме напоминают пластинки, покрытые тонкой жировой и оксидной пленкой. Насыпная плотность алюминиевой пудры 150–300 кг/м³, содержание активного алюминия 85–93 %.

Пылевидный молотый кварц — продукт измельчения сухого обогащенного кварцевого песка до прохождения через сетку 005 не менее 75 % продукта помола.

Каолин месторождения Ситница — глинистая порода с крупными включениями обломков

Таблица 1. Химический состав первичных каолинов, %

Место-рождение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	И.м.п.п.
Ситница	61,70	25,10	1,56	0,68	0,19	0,45	0,71	0,12	3,85	5,64
Дедовка	70,30	19,00	0,46	0,26	0,09	–	0,02	0,10	6,02	3,69

полевошпатово-кварцевого состава, чешуйками биотита, зернами кварца и полевого шпата. Также обнаружены ильменит, пирит, магнетит, силлиманит, андалузит, гранат, лейкоксен. Глинистая часть его состоит из крипточешуйчатого каолинита, в качестве примеси присутствуют гидрослюда.

Каолины месторождения Дедовка — породы желтовато-серой окраски с механическими примесями глауконито-кварцевого песка, мусковита, полевого шпата и обломками кристаллических пород, для вторичных каолинов характерен зеленоватый оттенок из-за примесей глауконита. В составе обломочной части первичных каолинов содержатся ильменит, лейкоксен, рутил, лимонит, пирит, циркон, турмалин, эпидот, гранат, сфен, анатаз, сидерит, фосфаты.

Механические примеси занимают 23,2–74,9 % объема и представлены угловатыми зернами, лунокатанной галькой и гравием серого кварца, розового кварцита, темно-серого и черного кремня, обломками кристаллических пород.

Минеральный состав первичного каолина месторождения Дедовка представлен каолинитом с примесями кварца и гидрослюд, а также с незначительным содержанием полевошпатовых включений. Химический состав природного каолина-сырца обоих месторождений приведен в табл. 1.

Для активации процесса синтеза применяли добавки кремнефтористого натрия и криолита, при этом их количество не превышало 5 %. При проведении исследований использовали также добавки борной кислоты, оксида титана и сульфата кальция.

Сырьевую смесь готовили сухим способом, смешивая исходные компоненты, предварительно дозированные на электронных весах, в течение 15 мин в шаровой мельнице с мелющими телами из алюмосиликатной керамики.

Для приготовления покрывающей массы в шихту при постоянном перемешивании добавляли раствор связующего, в качестве которого использовали этилсиликат, растворы жидкого стекла, а также фосфатов натрия, калия, алюминия, магния. Связующее добавляли в количестве, необходимом для получения пастообразной массы. Приготовленную массу наносили кистью на рабочую поверхность шамотного изделия слоем толщиной 1–2 мм. Необходимую для этого консистенцию регулировали количеством связующего. Изделие с покрытием

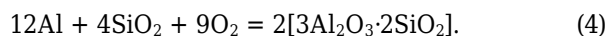
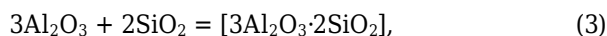
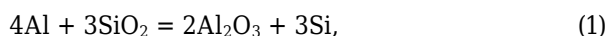
сушили при комнатной температуре в течение 24 ч, затем нагревали до 150 °С и выдерживали при этой температуре в течение 2 ч, после этого температуру повышали до 400–450 °С и изделие выдерживали в течение 1 ч для удаления связанной воды, затем его нагревали со скоростью 7–10 °С/мин до 800–900 °С для осуществления процесса СВС.

Образцы обжигали в лабораторной электропечи типа SNOL 6,7/1300 (на воздухе) при 1200–1300 °С, с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Обжиг при 1500 °С и выше проводили в газопламенной печи. Образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования были выбраны смеси, содержащие 15–20 % алюминия и 75–80 % кремнеземсодержащего компонента, в качестве которого использовали кварцевый песок и каолины месторождений Ситница и Дедовка.

В основе СВС-синтеза покрытий на основе этих смесей лежат следующие химические процессы, обеспечивающие формирование кристаллических фаз муллита, корунда и других алюмосиликатных соединений:



Введение каолина в состав исходной смеси для получения покрытия позволяет не только уменьшить количество алюминия, необходимого для формирования муллита, но и увеличить седиментационную устойчивость суспензии, применяемой при нанесении покрытия. Кроме того, вследствие повышенного содержания свободного кварца в смеси практически не происходит торможения процесса из-за эффекта разбавления контактной поверхности взаимодействующих компонентов глинистыми минералами и ее уменьшения.

Как показала визуальная оценка покрытий, формирующихся при использовании исследуемых смесей, наиболее оптимальны составы, содержащие 15 % алюминия. Полученные из них покрытия характеризуются хорошей адгезией к шамотной основе, отсутствием трещин после сушки и обжига. Оптимальное содержание каолина не превышает 30 %, при этом покрытия лучшего качества получа-

ются при использовании каолина месторождения Дедовка, что, видимо, связано с большим содержанием в нем свободного кварца. Это обеспечивает снижение усадочных явлений при сушке и обжиге покрытий и предотвращает появление трещин.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВС-ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СВЯЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

В качестве связующего при исследовании покрытий применяли этилсиликат, портландцемент, дигидрофосфат алюминия; водные растворы гидрофосфатов магния, калия и натрия, калиевое и натриевое жидкое стекло.

Наиболее важными характеристиками покрытия, используемого в высокотемпературных установках, являются максимальная температура применения и огнеупорность, которые зависят в первую очередь от соотношения температуры плавления, вязкости при высоких температурах и кристаллической и стекловидной фаз в спекаемой системе. Огнеупорность покрытий в зависимости от вида добавки и связующего представлена в табл. 2. Исследования проводили с использованием смеси из 85 % кварцевого песка и 15 % алюминия. Отсутствие каолина исключает внесение щелочных и щелочно-земельных оксидов в смесь. Огнеупорность оценивали визуально после окончания обжига при заданной температуре (1000–1300 °С) по наличию областей оплавления или стеклообразования на покрытии.

При исследовании покрытий, полученных с использованием различных связующих, установле-

Таблица 2. Огнеупорность покрытий в зависимости от вида добавки и типа связующего

Связующее	Огнеупорность при использовании добавки, °С				
	без добавки	кремнефтористый натрий (2 %)	борная кислота (5 %)	сульфат кальция (5 %)	диоксид титана (5 %)
Этилсиликат	>1300	>1300	>1300	1300	>1300
Портландцемент	1150	1100	1100	1100	1150
Дигидрофосфат алюминия	>1300	>1300	>1300	1300	>1300
Раствор:					
гидрофосфата магния	>1300	>1300	>1300	1150	>1300
гидрофосфата калия	>1300	>1300	>1300	1300	>1300
гидрофосфата натрия	1250	1200	1200	1100	1200
калиевого жидкого стекла	>1300	>1300	>1300	1300	>1300
натриевого жидкого стекла	1200	1150	1150	1100	1200

но, что огнеупорность покрытия выше 1300 °С достигается только при использовании связующих, не содержащих солей натрия, а также соединений кальция. Количество натрийсодержащих соединений, вводимых с добавками, не должно превышать 2 %.

При применении этилсиликата в качестве связующего возникают дефекты покрытия в виде трещин, что связано с большой усадкой связующего при высыхании и возникновением при этом напряжений. Кроме того, при термообработке выделяется значительное количество газообразных соединений.

В результате рентгенофазового анализа установлено, что фазовый состав покрытий в основном представлен силлиманитом, корундом и остаточным кварцем. При использовании связующих, содержащих фосфаты, после термической обработки наблюдается формирование фазы фосфата алюминия (рис. 1) и силикатов, однако при этом не обеспечивается спекание материала покрытия, о чем свидетельствует сравнительно высокая пористость (15–20 %).

Использование соединений калия в качестве связующих обеспечивает формирование высоковязкого расплава силикатов калия и способствует спеканию материала покрытия уже при низких температурах (1000–1100 °С), однако в отличие от соединений натрия не снижает его огнеупорность.

Таким образом, оптимальным связующим компонентом для СВС-смесей является калиевое жидкое стекло. Возможно применение и других связующих при условии эксплуатации покрытий при более низких температурах.

Фазовый состав покрытий, полученных на основе композиции, содержащей 85 % каолина и 15 % алюминия, с использованием в качестве связующего калиевого жидкого стекла и различных добавок, представлен на рис. 2. Как видно из представленных данных, формирование муллита достигается только при использовании в качестве кремнеземсодержащего компонента каолина и

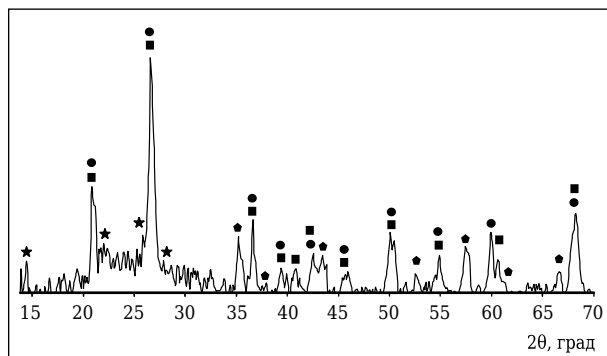


Рис. 1. Дифрактограмма покрытия со связующим из дигидрофосфата алюминия: ■ — фосфат алюминия AlPO_4 ; ● — кварц SiO_2 ; ◆ — корунд Al_2O_3 ; ★ — алюмосиликат $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 21\text{SiO}_2$

введении активирующих добавок — борной кислоты и кремнефтористого натрия.

При использовании смеси кварца и каолина не обеспечивается образование муллита из-за недостаточного количества оксида алюминия, который связывается не только кремнеземом с образованием силлиманита, но и силикатом калия, что снижает вероятность получения муллита.

Во время СВС-процесса формирование муллита обуславливается в основном фазовыми превращениями в каолине при его термообработке. Так, в интервале 450–600 °С удаляется химически связанная вода вследствие разложения каолинита по реакции



$[\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2]$ — метакаолинит. Это аморфный продукт, представляющий собой не механическую, а более тесную смесь глинозема и кремнезема с их взаимосвязью и частичным сохранением структуры каолиновой решетки. Каолинит, лишенный химически связанной влаги, необратимо теряет пластичность. Потеря массы составляет 2–8 %.

В интервале 950–1050 °С идет процесс муллитизации каолинита. При 1100 °С с выделением тепла метакаолинит перестраивается с образованием в конечной стадии муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$:



В дальнейшем с ростом температуры количество муллита непрерывно увеличивается и достигает максимума при 1250–1350 °С. Длительная выдержка при температурах выше 1200 °С не влияет на увеличение выхода муллита, но способствует росту его кристаллов.

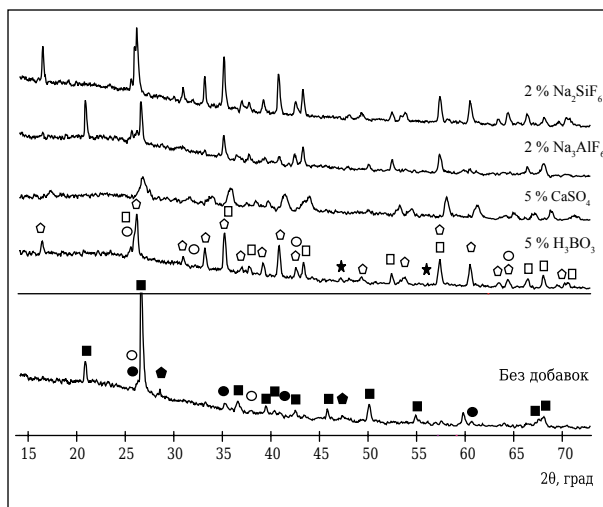


Рис. 2. Дифрактограммы покрытия, состоящего из 85 % каолина и 15 % алюминия с использованием различных добавок (содержание добавок указано на кривых): ■ — кварц SiO_2 ; ● — силлиманит Al_2SiO_5 ; ◆ — кремний Si ; ★ — микроклин KAlSi_3O_8 ; □ — корунд Al_2O_3 ; ○ — алюмосиликат калия KAlSi_2O_6 ; ◇ — муллит $\text{Al}_{4.75}\text{Si}_{1.25}\text{O}_{9.63}$

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВС-ПОКРЫТИЙ

При изучении структуры и свойств покрытий использовали композиции с калиевым жидким стеклом, термообработку проводили в электропечи при 1300 °С и выдержке 1 ч.

Данные оптической микроскопии показывают, что при увеличении содержания каолина в смеси возрастает количество пор в покрытии. Структура представлена кристаллическими образованиями, сцементированными аморфизированной стекловидной фазой. При введении добавки борной кислоты происходит формирование нитевидных образований, что повышает прочность материала покрытия.

Основные показатели, характеризующие защитное огнеупорное покрытие, — пористость, адгезионная прочность, термостойкость.

Как показали экспериментальные результаты, в случае применения немодифицированных смесей наибольшей адгезионной прочностью и меньшей пористостью характеризуются покрытия, полученные без применения каолина. Термостойкость покрытий практически ограничивается этим показателем шамотного огнеупора-основы и составляет 12–14 циклов 1100 °С – вода. Разрушение материала происходит вследствие возникновения и развития магистральных трещин на поверхности образца, на которой отсутствует покрытие. Измерение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) показало, что термическое расширение покрытия соответствует ТКЛР муллитокорундовых и шамотных огнеупоров. Графическая зависимость изменения пористости и адгезионной прочности покрытия от содержания каолина в смеси представлена на рис. 3.

Как следует из экспериментальных данных, при увеличении содержания каолина в смеси происходит увеличение пористости и снижение адгезионной прочности покрытия. Это объясняется менее активным протеканием процесса СВС вследствие увеличения доли неактивной составляющей. Кроме того, при увеличении количества каолина возникают, как отмечалось выше, усадочные явления, что приводит к образованию трещин.

В связи с этим был выбран состав смеси с содержанием каолина 15 %, при использовании которого обеспечивается равномерное нанесение покрытия и его достаточно высокая адгезия. На основе данного состава проведен синтез покрытий с введением добавок — активаторов процесса синтеза. На рис. 4 представлены зависимости пористости и адгезионной прочности покрытий от вида добавки.

Представленные графические зависимости свидетельствуют, что при введении добавок, активирующих процесс синтеза, происходит увели-

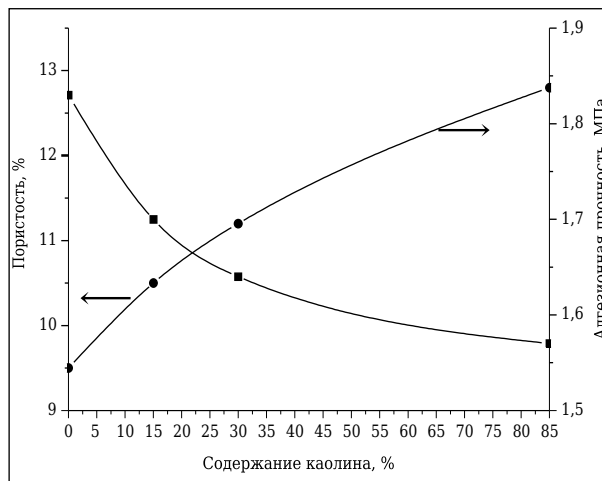


Рис. 3. Изменение пористости и адгезионной прочности покрытия в зависимости от содержания каолина

чение прочности сцепления покрытия с основой и уменьшение пористости вследствие дополнительного инициирования СВС-процесса и участия добавки в спекании покрытия при высоких температурах. Таким образом, оптимальными добавками, обеспечивающими высокую адгезионную прочность покрытия, являются диоксид титана и борная кислота в количестве 5–10 %.

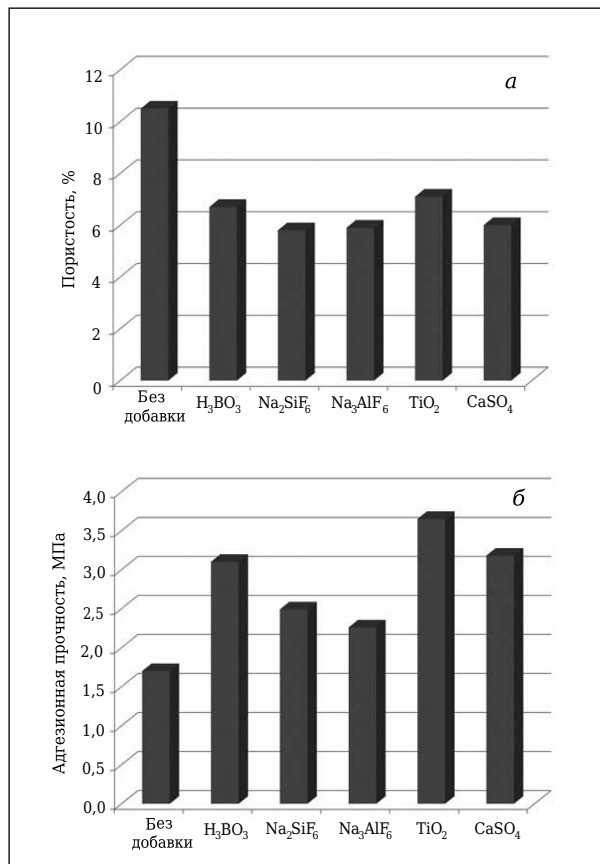


Рис. 4. Пористость (а) и адгезионная прочность (б) покрытий в зависимости от вида добавки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования по получению защитных СВС-покрытий на основе системы Al-SiO₂ на алюмосиликатных огнеупорах. В качестве кремнеземсодержащего компонента применяли кварцевый песок и каолины месторождений Дедовка и Ситница Республики Беларусь. Установлено, что использование смесей каолина и кварцевого песка снижает вероятность образования трещин в покрытии при сушке и обжиге и улучшает его качественные характеристики.

Показано, что огнеупорность покрытия выше 1300 °С достигается только при использовании связующих, не содержащих солей натрия. Также необходимо учитывать количество натрийсодержащих соединений, вводимых с добавками, которое не должно превышать 2 %. В результате рентгенофазового анализа установлено, что фазовый состав покрытий представлен в основном муллитом или силлиманитом, корундом и остаточным

кварцем. При этом формирование муллита обеспечивается только при использовании в качестве кремнеземсодержащего компонента каолина и активирующих добавок — борной кислоты и кремнефтористого натрия. При использовании связующих, содержащих фосфаты, после термической обработки покрытия в нем наблюдается формирование фаз фосфата алюминия и силикатов.

Исследованы физико-химические и термические свойства (плотность, пористость, адгезионная прочность, ТКЛР, огнеупорность, термостойкость) синтезированных керамических СВС-материалов и покрытий на их основе. Установлено влияние добавок на характеристики покрытий. Так, высокую адгезионную прочность имеют покрытия, содержащие добавки диоксида титана и борной кислоты.

В результате выполненных исследований для защиты конструктивных элементов теплотехнических установок разработаны составы покрытий на основе системы Al-SiO₂ и различных добавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Залкин, И. Я.** Огнеупоры и шлаки в металлургии / И. Я. Залкин, Ю. В. Троянkin. — М. : Металлургия, 1964. — 288 с.
2. Огнеупоры и футеровки / под науч. ред. И. С. Кайнарского. — М. : Металлургия, 1976. — 416 с.
3. **Стрелов, К. К.** Технология огнеупоров / К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин ; 3-е изд. — М. : Металлургия, 1978. — 370 с.
4. **Мержанов, А. Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А. Г. Мержанов ; науч. ред. Я. М. Колотыркин // Физическая химия. Современные проблемы : сб. науч. ст. — М. : Химия, 1983. — С. 6–45.
5. **Левашов, Е. А.** Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Рогачёв, В. И. Юхвид [и др.] ; под общ. ред. Е. А. Левашова. — М. : Бином, 1999. — 176 с.
6. **Сычёв, А. Е.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / А. Е. Сычёв [и др.] ; под общ. ред. А. Е. Сычёва. — Черноголовка : Территория, 2001. — 432 с.
7. **Мержанов, А. Г.** Твердопламенное горение / А. Г. Мержанов. — Черноголовка : ИСМАН, 2000. — 224 с.
8. Магнезиальные огнеупоры / под общ. ред. Л. Б. Хорошавина. — М. : Интернет Инжиниринг, 2001. — 575 с.
9. **Владимиров, В. С.** Новое поколение теплозащитных и огнеупорных материалов. Ч. 1 / В. С. Владимиров, И. А. Карпунин, С. Е. Мойзис // По всей стране. — 2002. — № 8. — С. 14–17.
10. **Владимиров, В. С.** Новое поколение теплозащитных и огнеупорных материалов. Ч. 2 / В. С. Владимиров, И. А. Карпунин, С. Е. Мойзис // По всей стране. — 2002. — № 33. — С. 12–20.
11. **Владимиров, В. С.** Разработка и создание новых видов огнеупорных и теплоизоляционных материалов и покрытий для высокотемпературных тепловых агрегатов / В. С. Владимиров, А. П. Галаган, М. А. Илюхин [и др.] // Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии

- : материалы II междунар. науч.-практ. конф., Москва, 3–5 декабря 2002 г. — М. : МИСиС, 2002. — С. 58–60.
12. **Пат. 2101263 РФ**, МПК⁷ С 04 В 35/66. Муллитовый материал для производства огнеупорных изделий, способ изготовления муллитового материала для производства огнеупорных изделий и огнеупорное слоистое изделие / Мальцев В. М., Гафиятуллина Г. П., Уваров Л. А., Волков В. Т. ; заявитель ЗАО «Диагностика аварийных ситуаций». — № 96104130/03 ; заявл. 29.02.96 ; опубл. 10.01.98, Бюл. № 1.
13. **Пат. 2049763 РФ**, МПК⁷ С 04 В 41/87. Способ получения упрочняющего покрытия на пористых материалах / Мальцев В. М., Бутакова Э. А., Корсун С. Д., Рязанцева Е. Н., Кондратенко А. Д. ; заявители В. М. Мальцев, Э. А. Бутакова, С. Д. Корсун, Е. Н. Рязанцева, А. Д. Кондратенко. — № 5023777/33 ; заявл. 23.01.92 ; опубл. 10.12.95, Бюл. № 34.
14. **Первухин, Л. Б.** Синтез муллитового покрытия при локальном нагреве / Л. Б. Первухин, В. С. Владимиров, С. Е. Мойзис [и др.] // Новые огнеупоры. — 2007. — № 1. — С. 45–47.
15. **Филимонова, Н. В.** Изучение возможности воспламенения шихты огнеупорного мертеля «Фурнон-3» при использовании алюминий-магниевого восстановителя / Н. В. Филимонова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 1996. — № 10. — С. 16–19.
16. Новые виды материалов. Перспективные огнеупорные и теплозащитные материалы и покрытия для экстремальных условий эксплуатации // Официальный сайт Международного консорциума «MaBP»TM [Электронный ресурс]. — 2005. — Режим доступа : <http://www.mavr.ru/og1.htm>. — Дата доступа : 25.05.13.
17. Elementary process in SiO₂-Al termite reaction activated and induced by mechanochemical treatment / G. T. Hida, I. J. Liu // Amer. Ceram. Soc. Bull. — 1988. — Vol. 67, № 9. — P. 1508. ■

Получено 28.06.13

© К. Б. Подболотов, Е. М. Дятлова,
Р. Ю. Попов, 2013 г.