

К. т. н. **Р. Д. Капустин**¹ (✉), д. т. н. **Е. С. Мойзис**²

¹ ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова Российской академии наук (ИСМАН)», г. Черноголовка Московской обл., Россия

² ЗАО «Научно-производственно-коммерческая фирма «МаВР», г. Жуковский Московской обл., Россия

УДК 666.762.1:546.26-494

О ВЛИЯНИИ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АС-МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты исследований воздействия высоких температур на высокоогнеупорные неформованные материалы на основе тугоплавких оксидов и силицидов, а также влияния минеральных добавок на их структуру и физико-механические характеристики. Установлено, что неформованные алюмосиликатные материалы на основе электроплавленного или табулярного корунда способны работать без потери своих свойств при температуре эксплуатации не ниже 1600 °С. Введение в материал углеродной или базальтовой микрофибры позволяет уменьшить массу и плотность корундовых огнеупоров, но одновременно увеличивает их линейную усадку под воздействием высоких температур.

Ключевые слова: алюмосиликатные СВС-материалы (АС-материалы), футеровка тепловых агрегатов, вторичный корунд, электроплавленный корунд, прочностные свойства.

Ранее [1] были опубликованы результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и огнеупорности новых модификаций огнеупорных материалов с улучшенными физико-химическими, механическими и эксплуатационными характеристиками. В частности, исследовали неформованные высокопрочные огнеупоры производства ЗАО НПКФ «МаВР», разработанные на основе алюмосиликатных СВС-материалов (АС-материалов), и изделия на их основе [2]. Настоящая статья посвящена исследованиям влияния разных добавок в составе АС-материалов на их физико-механические и огнеупорные свойства и выявлению наиболее перспективных добавок для изготовления футеровки тепловых агрегатов, а также изделий, подвергаемых воздействию сверхвысоких температур. Результаты исследований позволят усовершенствовать составы и технологию получения АС-огнеупоров, оценить влияние различных добавок на их физико-механические характеристики, а также получить новую серию высокопрочных огнеупоров с заданными свойствами. В частности, введением добавок решаются задачи уменьшения массы АС-огнеупора при сохранении огнеупорных и прочностных свойств, что важно при изготовлении крупногабаритной материалоемкой футеровки тепловых агрегатов, а также миними-

зации линейной усадки при воздействии сверхвысоких температур (>1600 °С).

На первом этапе исследований были изготовлены серии образцов четырех различных модификаций из алюмосиликатных бетонов, которые различались плотностью и составом. Методика экспериментов предусматривала получение методом «холодного вспучивания» из жидко-вязкой смеси (шликера) образцов АС-материалов, их обжиг до 1350 и 1600 °С с последующим исследованием физико-механических характеристик и изменений структуры. Физические характеристики образцов приведены в табл. 1. Образцы изготавливали из неформованных материалов на основе шамотно-корундовых смесей. В состав образцов № 1 и 3 входил корунд вторичной переработки (вторичный корунд), в состав образцов № 3 и 4 вводили базальтовую микрофибру в количестве 0,5 мас. %. Все образцы были подвергнуты естественной сушке при комнатной температуре не менее 72 ч, а затем термообработке по режиму, показанному на рис. 1. Максималь-

Таблица 1. Номенклатура шамотно-корундовых образцов* для испытаний

Номер образца	Марка, состав	Средняя масса, г
1	ВБФ 1700, наполнитель — шамот, вторичный корунд	1860
2	ВБФ 1700, наполнитель — шамот, корунд	1610
3	ВБФ 1700, наполнитель — шамот, вторичный корунд, базальтовая микрофибра	1650
4	ВБФ 1700, наполнитель — шамот, корунд, базальтовая микрофибра	1540

* Форма образцов — куб с ребром 100 мм.



Р. Д. Капустин
E-mail: kapustin-roman@mail.ru

ная температура термообработки составляла 1350 и 1600 °С. При 1600 °С происходило расплавление либо оплавление образцов всех составов.

Результаты влияния воздействия температуры 1350 °С на свойства материалов приведены в табл. 2, из которой видно, что образцы № 1 и 3 с вторичным корундом претерпели значительную усадку (не менее 5 %), образцы на основе шамота и электрокорунда — незначительную линейную усадку (2 %). Кроме того, образец № 4 имел меньшую массу, чем остальные. Это означает, что введение базальтовой микрофибры в количестве всего 0,5 мас. % позволяет значительно снизить плотность и массу материала без потери его огнеупорных свойств, что может быть принципиально важным при изготовлении футеровки или ее элементов крупногабаритных тепловых агрегатов.

На втором этапе экспериментов исследовали корундовые материалы (табл. 3), в том числе с применением вторичного корунда (образец № 5), электроплавленного корунда (образец № 6) и высокочистого Al_2O_3 (образец № 7). Образец № 8 был изготовлен на основе табулярного корунда (табулярный глинозем), представляющего собой крупнокристаллические гранулы, обожженные при 1950 °С. Такой корунд носит название «табулярный» (пластинчатый), так как его кристаллы имеют пластинчатую форму и размер от 50 до 150 мкм. Образцы № 9 и 10 были изготовлены на основе электроплавленного корунда с добавками базальтовой и углеродной микрофибры соответственно.

По результатам испытаний в лабораторной камерной электропечи (рис. 2) образца № 5, в составе которого использовали вторичный корунд с большим количеством металлических включений, была установлена линейная усадка более 5 % уже при воздействии температуры 1350 °С; при 1600 °С образец расплавился. Все остальные образцы при воздействии температуры 1350 °С претерпели линейную усадку

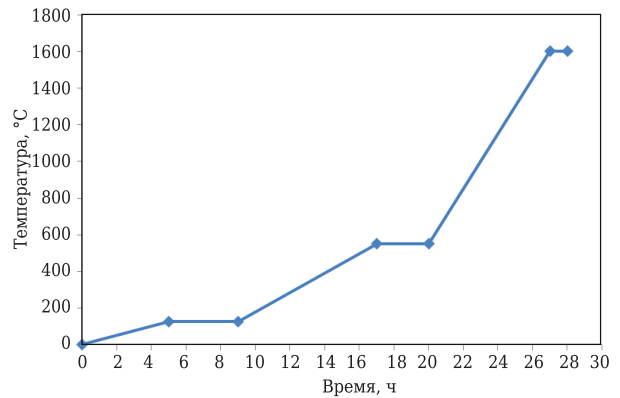


Рис. 1. Температурный режим нагрева образцов

не более 3 % (кроме образца с добавкой углеродной микрофибры). После термообработки до 1600 °С линейная усадка всех образцов составила не менее 5 % (табл. 4). Наибольшие изменения размеров (до 9 %) зафиксированы у образца № 10 с добавкой углеродной микрофибры, что связано с ее выгоранием при воздействии сверхвысоких температур. Наименьшая линейная усадка (до 6 %) зафиксирована у образцов на основе табулярного корунда.

Исследования микроструктуры (рис. 3) показали, что в образцах на основе электроплавлен-



Рис. 2. Образцы для термообработки в электропечи

Таблица 2. Масса и линейные размеры образцов после обжига

Номер образца	Средний размерный параметр, мм		Усадка, %	T_{max} , °С	Масса после обжига, г
	до обжига	после обжига			
1	100	95	5	1350	1600
2	100	98	2	1350	1440
3	100	94	6	1350	1400
4	100	98	2	1350	1290

Таблица 3. Номенклатура корундовых образцов* для испытаний

Номер образца	Количество, шт.	Марка, состав	Масса, г
5	1	ВБФ 1700, наполнитель — вторичный корунд	1940
6	1	ВБФ 1700К, наполнитель — электроплавленный корунд	2360
7	1	ВБФ 1700К Sintal F280, наполнитель — электроплавленный высокочистый корунд	2610
8	1	ВБФ 1700К Coral F280, наполнитель — табулярный корунд	2620
9	2	ВБФ 1700КБ, наполнитель — электроплавленный корунд, базальтовая микрофибра	2610
10	1	ВБФ 1700КУ, наполнитель — электроплавленный корунд, углеродная микрофибра	2380

* Форма образцов — куб с ребром 100 мм.

Таблица 4. Масса и линейные размеры корундовых образцов после обжига

Номер образца	Средний размерный параметр, мм		Усадка, %	T_{\max} , °C	Масса после обжига, г
	до обжига	после обжига			
5	100	94,7	5,3	1350	1780
6	100	91,9	8,1	1600	2030
7	100	93,3	6,7	1600	2220
8	100	94,0	6,0	1600	2240
9	100	93,0	7,0	1600	2300
10	100	91,0	9,0	1600	2050

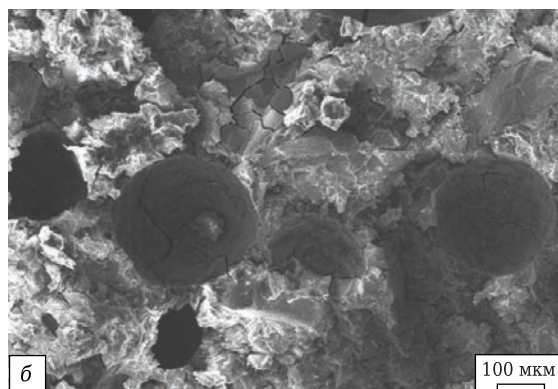
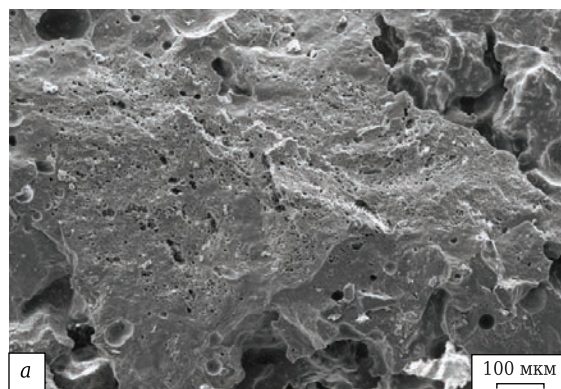


Рис. 3. Микроструктура образцов после термообработки до 1600 °C: а — образец ВБФ 1700 с вторичным корундом; б — образец ВБФ 1700К без микрофибры

ного корунда после термообработки до 1600 °C хорошо просматриваются шарообразные агрегаты корунда, в то время как в образцах на основе вторичного корунда обнаруживается оплавленная структура материала, что связано с большим количеством металлических включений.

На третьем этапе из исследуемых АС-материалов были изготовлены образцы-кубы с ребром 50 мм для проведения механических испытаний (предел прочности при сжатии), в том числе после термообработки при различных температурах. Результаты показали, что все исследуемые АС-огнеупоры на основе неформованных корундовых материалов обладают пределом прочности при сжатии 10–15 МПа. В частности, АС-материал марки ВБФ 1700К после термообработки до 1350 °C обладает пределом прочности при сжатии не менее 20 МПа, а после термообработки до 1600 °C он возрастает до 30 МПа и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате экспериментальных исследований было установлено:

- шамотно-корундовые неформованные АС-огнеупоры способны эффективно работать при воздействии температур до 1350 °C (линейная усадка не более 2 %);

- введение базальтовой микрофибры позволяет значительно уменьшить массу шамотно-корундового материала без потери его огнеупорных свойств;

- корундовые огнеупоры (независимо табулярный, электроплавный или сверхчистый

корунд) способны работать до 1600 °C. Линейная усадка при этом составляет 6–7 %;

- введение углеродной микрофибры позволяет уменьшить массу и плотность корундовых огнеупоров, но одновременно увеличивает их линейную усадку до 9 % при 1600 °C вследствие выгорания фибры.

2. Прочность корундовых огнеупоров после термообработки до 1600 °C, как правило, не снижается или возрастает до 50 %.

3. Конструкционные огнеупорные материалы производства ЗАО НПКФ «МаВР» являются неформованными и применяются по заливной технологии. Они имеют высокую рабочую температуру и не требуют ни вибро-, ни прессового оборудования, их применение высокоэффективно в таких проблемных элементах печей, как горелочные камни, дефлекторы, балки и др.

Разработанные огнеупорные бетоны могут применяться в качестве ремонтных составов при горячем ремонте работающих тепловых агрегатов (без их остановки).

Библиографический список

1. **Мойзис, Е. С.** Разработка и применение новых высокоэффективных конструкционных огнеупорных материалов / Е. С. Мойзис, Р. Д. Капустин, М. А. Илюхин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2015. — № 11/12. — С. 34–37.
2. **Владимиров, В. С.** Новые огнеупорные и теплоизоляционные материалы и технологии их производства / В. С. Владимиров, А. П. Галаган, М. А. Илюхин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2002. — № 1. — С. 81–88. ■

Получено 31.08.18

© Р. Д. Капустин, Е. С. Мойзис, 2019 г.