Д. т. н. **П. М. Плетнев**[1] (✉), д. т. н. **В. М. Погребенков**[2], д. т. н. **В. И. Верещагин**[2], к. т. н. **Д. С. Тюлькин**[3]

[1] *ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)», г. Новосибирск, Россия*
[2] *ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия*
[3] *АО «НЭВЗ-Керамикс», ООО «Керамик-Инжиниринг», г. Новосибирск, Россия*

УДК 666.762.14.017:620.186

МУЛЛИТОКОРУНДОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МУЛЛИТОВОЙ СВЯЗКИ, СТОЙКИЕ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ

Изложены результаты разработки муллитокорундовых материалов на основе тугоплавкого наполнителя (муллита или корунда) и высокоглиноземистой керамической связки (игольчатого муллита и мелкозернистого корунда). Представлены и реализованы модели структуры фрагментарного типа муллитокорундового материала, обеспечивающие высокие огнеупорные свойства.

Ключевые слова: *муллитокорундовый материал, тугоплавкий наполнитель, высокотемпературная керамическая связка, игольчатый муллит, структура фрагментарного типа.*

ВВЕДЕНИЕ

Муллитокорундовые материалы с содержанием Al_2O_3 от 72 до 95 мас. % занимают заметную долю в выпуске огнеупорной продукции и обладают достаточно высоким уровнем эксплуатационных свойств [1, 2]. Физико-технические показатели различных марок огнеупоров муллитокорундового состава колеблются по пределу прочности при сжатии от 30 до 80 МПа, по температуре деформации под нагрузкой от 1500 до 1660 °С, по пористости от 16 до 24 %. Муллитокорундовые огнеупоры отечественного производства изготавливают на глинистой связке [1–4], содержащей как стеклообразующий оксид, так и оксиды, понижающие температуру образования жидкой фазы. Последнее является крайне нежелательным при получении муллитокорундовых огнеупоров, стойких к высокотемпературным деформациям (>1600 °С). Необходимость таких огнеупорных материалов существует, в частности, при производстве технической керамики, обжигаемой при 1500–1700 °С.

Огнеупорная оснастка, используемая при производстве алюмооксидной керамики, должна удовлетворять следующим требованиям: огнеупорность не ниже 1700 °С; стойкость к воздействию сжимающих и изгибающих усилий при температурах выше 1650 °С, а также деформаций (выдерживание без разрушений не менее 50 теплосмен в режиме 20–1650–20 °С); отсутствие взаимодействия с обжигаемыми деталями; отсутствие дефектов в виде выплавок, окрашивающих легкоплавких пятен, железосодержащих соединений для исключения поверхностного загрязнения обжигаемых деталей.

Система муллит – корунд позволяет реализовать проектирование составов огнеупоров с высокими целевыми свойствами с учетом кристаллохимических и физико-технических характеристик муллита и корунда [1–11]. Обеспечение требуемых физико-механических характеристик огнеупоров, испытывающих в процессе службы высокотемпературные и механические нагрузки, может быть достигнуто путем формирования фрагментарной структуры материала, состоящей из каркаса зерен тугоплавкого наполнителя (определенного фракционного состава), скрепленного керамической связкой из соединений, близких по фазовому и химическому составам к основному веществу с заданной пористостью. При выборе тугоплавкого наполнителя необходимо учитывать существенные различия в свойствах электроплавленого и спеченного корунда [12]. В нашем случае огнеупоры не работают в условиях химически агрессивных сред, поэтому наиболее перспективными являются электроплавленые виды муллита или корунда. Плав-

✉
П. М. Плетнев
E-mail: Pletnevpm@stu.ru

леные наполнители имеют плотное строение, в их порошках присутствуют зерна округлой или призматической формы, что может положительно влиять на формирование структуры и улучшение формуемости.

Высокие термомеханические свойства огнеупорного материала определяются видом наполнителя и составом керамической связки, которая скрепляет зерна наполнителя и существенно влияет на формирование структуры материала. Показано [13, 14], что импортные огнеупоры, используемые для этой цели, относятся к муллитокорундовой группе и практически не содержат стеклофазы. При этом использование отечественного сырья в виде белого электроплавленого корунда, обогащенных марок глинозема и каолина позволяет решить задачу по импортозамещению — разработать состав и технологию получения муллитокорундовых изделий со свойствами, удовлетворяющими эксплуатационные требования.

Цель настоящего исследования — разработка состава и технологии получения огнеупорных изделий взамен импортной продукции, основываясь на изучении физико-химических процессов, протекающих при совместном обжиге компонентов шихты на основе муллитового или корундового наполнителя и тонкодисперсного глинозема с каолином, образующих керамическую связку муллитокорундового состава.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При исследовании фазового и элементного составов, морфологии и размеров частиц (кристаллов) исходных компонентов, продуктов синтеза керамической связки и огнеупорных материалов применяли рентгенофазовый дифрактометр ДРОН-3М; сканирующий электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6010la («Jeol», Япония) с термической эмиссией; последовательный спектрометр ARL PERFORM'X с мощностью излучения до 4,2 кВт и анализируемой площадью от 0,5 до 35 мм; оптический микроскоп «ЛабоМет-И». Дифференциально-сканирующий калориметр (ДСК) «STA 449 F3 Jupiter» применяли для изучения процессов, происходящих при нагреве экспериментальных составов. Удельную поверхность порошков измеряли на анализаторе типа NOVA 2200e («Quantachrome», США), а их гранулометрический состав — на лазерном анализаторе типа PRO-7000 («Seishin Enterprise Co.», Ltd, Япония).

В качестве исходных материалов использовали белый электрокорунд (ТУ 3989-027-00221066–01) производства ОАО «Юргинские абразивы» (г. Юрга Кемеровской обл.) двух фракций — мельче 0,5 и 0,5–3,0 мм; глинозем марки ГН (ГОСТ 30558) Бокситогорского глиноземного завода; каолин марки КЖФ (ТУ 5729-090-002845-30–00) (Журавлиный Лог Челябинской обл.). При выборе исходных материалов учитывали как нормативные показатели качества, так и результаты исследования этих материалов [15–17], а также сформулированные в работе [18] технические требования и физико-химические принципы проектирования составов огнеупорных материалов, применяемых для производства технической керамики.

Белый электрокорунд фракций мельче 0,5 и 0,5–3,0 мм представляет собой достаточно чистый исходный материал; содержание примесей не превышает 1,0 мас. %. Во фракции мельче 0,5 мм содержание примесей возрастает (табл. 1). Морфология электрокорунда представлена хорошо закристаллизованными монолитными зернами преимущественно шестигранной формы (рис. 1).

Глинозем марки ГН по химическому составу является материалом с содержанием примесей не более 0,3 мас. %, по размеру исходных частиц — высокодисперсный порошок. По минеральному составу это однофазный продукт с содержанием α-Al_2O_3 99,70 мас. %; содержание остальных оксидов, мас. %: Fe_2O_3 0,02, SiO_2 0,08, Na_2O 0,10; $\Delta m_{прк}$ 0,10 мас. %. Преимущественный размер частиц в виде пластин находится в

Таблица 1. **Зерновой и химический составы белого электрокорунда разных фракций**

Фракция, мм	Доля зерен вне границ фракции, мас. %	Химический состав, мас. %			
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Na_2O
0,5–3,0	> 3,0 мм не более 5, < 0,5 мм не более 10	99,60	0,17	0,05	0,18
<0,5	> 0,5 мм не более 5	99,50	0,17	0,06	0,27

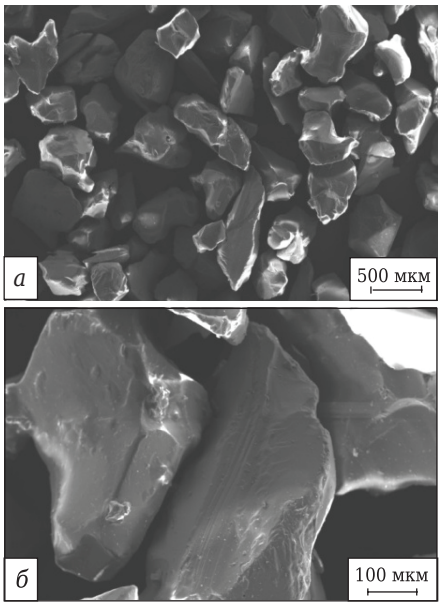


Рис. 1. Микрофотографии электрокорунда при 30- (*а*) и 150-кратном увеличении (*б*)

диапазоне от 5 до 65 мкм; встречаются плотные агрегаты, состоящие из мелких зерен (рис. 2). Выявленные рефлексы на рентгенограмме исходного глинозема соответствуют одному соединению — α-Al_2O_3 (PDF 46-1212).

Из отечественных каолинов особый интерес для изготовления муллитокорундовых материалов представляет обогащенный каолин марки КЖФ. Измерение гранулометрического

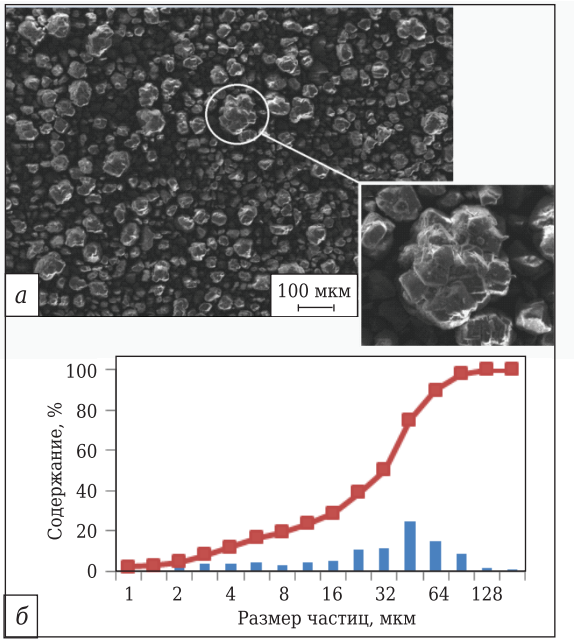


Рис. 2. Микрофотография исходного глинозема марки ГН (*а*, ×100) и его гранулометрический состав (*б*): ■ — распределение по фракциям; –■– — накопительное распределение

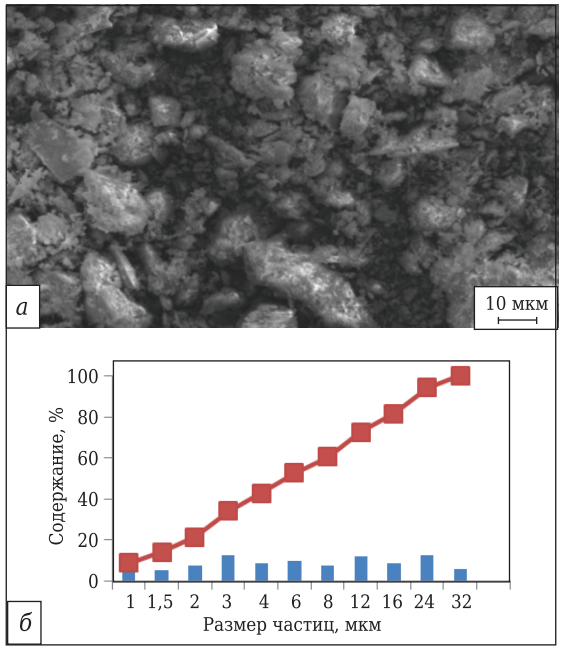


Рис. 3. Микрофотография каолина (*а*, ×100) и распределение частиц каолина марки КЖФ по размерам (*б*): ■ — распределение по фракциям; –■– — накопительное распределение

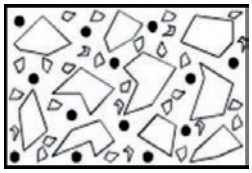
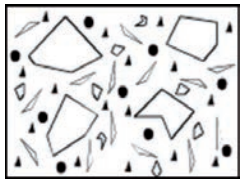
состава (рис. 3) показало, что порошок каолина высокодисперсный, равномерно распределен по фракциям от 1 до 35 мкм, с преимущественным распределением в интервале от 1 до 12 мкм. Частицы образуют агрегаты неправильной формы. Химический состав обогащенного каолина марки КЖФ, мас. %: SiO_2 47,4, Al_2O_3 36,7, Fe_2O_3 0,6, TiO_2 0,4, CaO 0,5, MgO 0,1, K_2O 0,5, Na_2O 0,3; $\Delta m_{прк}$ 14. Содержание примесей не более 2,5 мас. %.

Результаты рентгенофазового анализа исходного каолина марки КЖФ фиксируют в качестве основной фазы каолинит (PDF 78-1996) и подчиненную фазу — галлуазит (PDF 46-1409). Это указывает на то, что выбранные марки исходных материалов предпочтительны для создания муллитокорундовых огнеупоров. Возможность присутствия корунда и муллита в структуре огнеупорного материала обусловлена как химическим сродством этих соединений и высокой огнеупорностью ($T_{пл}$ корунда 2050 °С, $T_{пл}$ муллита 1850 °С), так и близостью их физико-механических характеристик (ТКЛР, модуль упругости, прочность), что предотвращает возникновение экстремальных механических напряжений в материале и тем самым повышает его термомеханическую стойкость.

Важным принципом в формировании структуры огнеупорного материала является получение структуры фрагментарного типа с заданным содержанием пор, поскольку пористая структура может «гасить» зарождающиеся микротрещины и тормозить их распространение по изделию. Для большинства огнеупоров пористость колеблется от 15 до 30 %, при более плотной структуре распространение микротрещин увеличивается, а повышенная пористость (>30 %) приводит к снижению прочности огнеупора на изгиб и сжатие. Создание фрагментарной структуры огнеупора было обеспечено за счет применения в шихте наполнителя полифракционного состава (электроплавленого муллита или корунда) и керамической связки определенного состава. О влиянии зернового состава керамики на основе электроплавленого корунда на формирование открытой пористости и прочности указано в статье [19].

Поскольку основное назначение керамической связки состоит в надежном скреплении зерен наполнителя с обеспечением фрагментарной структуры, то для активации спекания изделий целесообразно применять связку в виде армирующего тонкоигольчатого муллита. Муллитообразование может быть осуществлено одновременно с процессом обжига огнеупорных изделий. В табл. 2 приведены модели фрагментарной структуры составных элементов (кристаллического каркаса и керамической связки) и непосредственно огнеупорного материала муллитокорундового состава.

Таблица 2. **Модели фрагментарной структуры муллитокорундовых материалов**

Модель	Прогнозируемый характер воздействия на свойства
 Модель 1: структура полифракционного наполнителя без керамической связки	Придание материалу высокой термостойкости при малой прочности и нетехнологичности при формовании изделия
Модель 2: структура керамической связки муллитокорундового состава	Снижение высокотемпературных деформаций и термостойкости при повышенной прочности
 Модель 3: структура муллитокорундового огнеупора	Повышенный уровень термостойкости и снижение высокотемпературных деформаций при умеренной прочности

⌂ — зерна наполнителя (муллит или корунд размерами от 0 до 3,0 мм);
Δ — керамическая связка (игольчатые кристаллы муллита размерами 5–30 мкм);
▲ — зерна корунда размерами 1–10 мкм; ● — поры размерами 10–40 мкм.

Следует отметить, что согласно представленным моделям и прогнозируемому характеру их действия на целевые свойства огнеупора каждый составляющий элемент структуры придает материалу определенную функцию. Так, создание тугоплавкого кристаллического каркаса из инертного малоусадочного наполнителя — полифракционных зерен муллита или корунда (модель 1) потенциально должно обеспечить материалу наряду с высокой огнеупорностью повышенную стойкость к термоударам. Однако слабый контакт зерен наполнителя из-за недостаточного количества зерен керамической связки приводит к технологическим сложностям на этапе формования этого материала и к низким показателям прочности в спеченном виде. Это может оказаться критичным при воздействии механических нагрузок. Обожженный материал с таким типом структуры не претерпевает значительных объемных изменений по сравнению с исходным состоянием, характеризуется малой усадкой из-за небольшого количества точек контакта и низкой активностью при спекании.

Использование малого количества наполнителя (модель 2) в структуре огнеупорного материала с большим количеством активных к спеканию зерен провидит к созданию плотной структуры материала, обладающей повышенной прочностью, но низкой стойкостью к термоударам. Распространение трещин в таком типе структуры не будет задерживаться и останавливаться на крупных зернах наполнителя.

Преимущества модели 3 заключаются в возможности регулирования прочностных и огнеупорных характеристик материала за счет композиции крупнозернистого наполнителя и мелкозернистой фракции. При обжиге такой материал не будет испытывать значительных уплотнений, сохраняя «общий тугоплавкий каркас». Частицы мелкозернистой фракции, активные к спеканию, создадут дополнительные точки контакта между крупными зернами, увеличат прочность связей между ними и материала в целом (по сравнению с моделью 1). В этом случае структуру материала можно условно разделить на фрагменты из инертного наполнителя и мелкозернистой керамической связки. При этом распространение трещин в мелкозернистой составляющей будет задерживаться, останавливаясь на крупных зернах и порах (в отличие от модели 2).

Следует отметить, что наличие инертных крупных зерен наполнителя позволяет снижать ползучесть материала из-за эффекта армирования мелкозернистой составляющей (матрицы). Формирование керамической связки муллитокорундового состава с игольчатыми кристаллами муллита и мелкозернистым корундом должно придать материалу повышенную прочность и необходимую стойкость при воздействии термомеханических нагрузок. В свою очередь, равномерно распределенные поры в матрице материала должны выполнять блокировочную роль в распространении возникающих трещин при воздействии механических нагрузок. Предотвратить нарушение контакта зерен связки с крупными зернами наполнителя можно за счет введения промежуточной более мелкой фракции инертного наполнителя, частицы которого будут располагаться вместе с керамической связкой между крупными зернами. В процессе обжига изделий мелкая фракция наполнителя будет способствовать уменьшению объемных изменений при спекании керамической связки.

Следовательно, повышение прочности связи между зернами наполнителя и кристаллами керамической связки можно активировать путем увеличения дисперсности мелкозернистой составляющей и игольчатой структуры муллита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выбор состава шихт и керамической связки был осуществлен на основании кривых плавкости, построенных по диаграмме состояния систе-

мы Al_2O_3–SiO_2 [20]. Из кривых плавкости (рис. 4) следует, что материалы с содержанием Al_2O_3 более 75,0 мас. % должны иметь высокую устойчивость к высокотемпературным деформациям, поскольку жидкая фаза до 1850 °С не должна появляться (при исключении присутствия легкоплавких примесей). Согласно данным дифференциально-сканирующей калориметрии для смеси глинозема марки ГН и каолина марки КЖФ в соотношении 1,8 : 1,0 характерным является наличие двух эндотермических эффектов

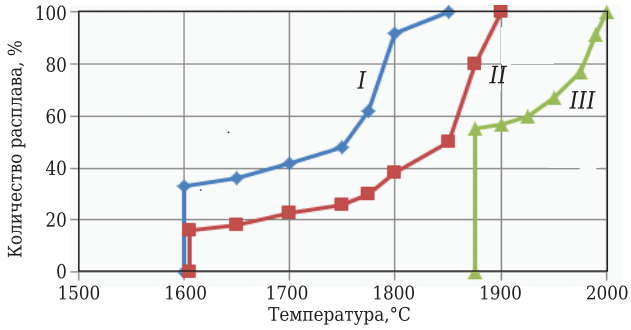


Рис. 4. Кривые плавкости при соотношении Al_2O_3 : SiO_2, равном 1 : 1 (*I*), 6 : 4 (*II*) и 9 : 1 (*III*)

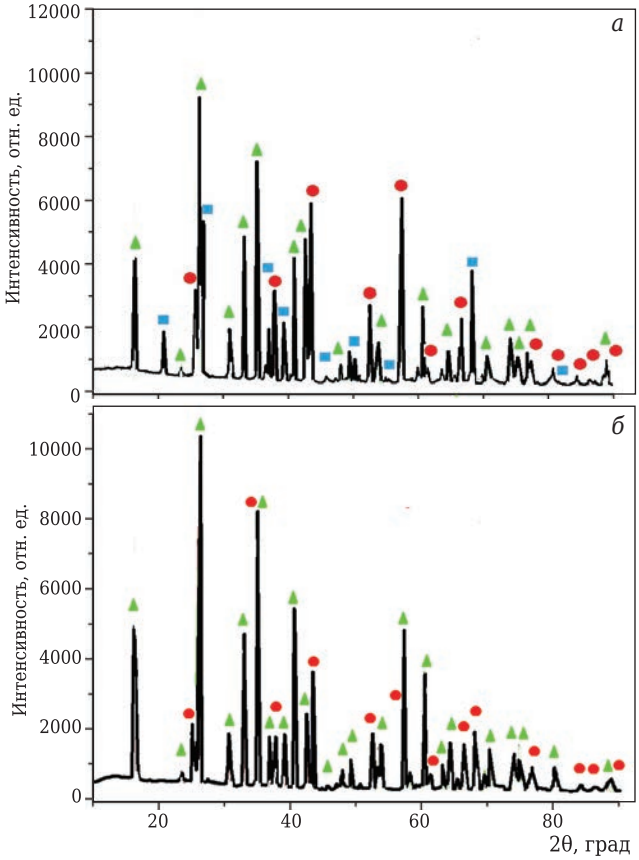


Рис. 5. Рентгенограммы смеси каолина с глиноземом после термообработки при 1650 °С: *а* — исходный глинозем, $d_{ср}$ = 30 мкм; ▲ — муллит $Al_6Si_2O_{13}$ (PDF 15-776); ■ — кварц (PDF 85-796); ● — корунд (PDF 71-1241); *б* — тонкоизмельченный глинозем, $d_{ср}$ = 2÷4 мкм; ▲ — муллит $Cr_{0,5}(Al_{3,93}Si_{1,57})O_{9,79}$ (PDF 15-776); ● — корунд (PDF 75-1862)

при 100–200 и 516,8 °С, которые связаны соответственно с удалением влаги, адсорбированной порошком, и началом разложения каолинита. Экзотермический эффект примерно при 994 °С характерен для каолинита и обусловлен образованием из метакаолина алюмокремниевой шпинели, из которой при повышении температуры образуется муллит. Потери массы шихты плавно происходят до интервала 432,1–464,1 °С с последующим резким увеличением до 589,5–601,1 °С. Основные потери массы происходят в интервале 589,5–601,1 °С и составляют 3,00–3,35 мас. %. Общие потери массы при нагреве не превышают 5,0 мас. %. Основная доля потерь массы шихты при нагреве связана с процессами разложения каолина.

Результаты рентгенофазового анализа смеси каолина с глиноземом после термообработки при 1650 °С (рис. 5) свидетельствуют, что образование муллита зависит от дисперсности глинозема. При использовании в смеси исходного глинозема фиксируется трехфазный продукт с присутствием остаточного оксида кремния в виде кристобалита (см. рис. 5, *а*). Использование измельченного до среднего размера частиц 2–4 мкм глинозема активирует процессы муллитообразования, и получаемый после термообработки продукт представлен только муллитом и корундом (см. рис. 5, *б*).

Для экспериментальных муллитокорундовых составов на основе муллитового наполнителя (табл. 3) использовали плавленый муллит крупной фракции (2,0–5,0 мм), средней (0,45–2,0 мм) и мелкой (<0,45 мм). Образцы обжигали в туннельной печи при максимальной температуре 1650 °С, выдержка 1,5 ч. Согласно полученным данным (табл. 4) наибольшими плотностью и прочностью обладали образцы состава 1 с наименьшим содержанием наполнителя (30 мас. %). При соотношении наполнитель : керамическая связка 1 : 1 (составы 2, 3, 4, 6) образцы оказались малоусадочными с пористостью около 21 % и пределом прочности при сжатии более 50 МПа. Повышение содержания наполнителя в шихте до 70 мас. % (состав 5) затрудняет спекание образцов. Огнеупорность образцов всех составов выше 1700 °С.

Анализ микроструктуры муллитокорундовых образцов (рис. 6) и элементного состава различных ее зон выявил, что зерна наполнителя неправильной формы скреплены керамической связкой, состоящей из игольчатых кристаллов муллита (~ 10 мкм) и мелких зерен корунда (2–3 мкм), образуя фрагментарную структуру материала с межкристаллической пористостью. О положительном влиянии на термостойкость огнеупорного материала образующихся нитевидных кристаллов муллита, выступающих в виде компонента керамической связки, имеется много информации [9–11].

Таблица 3. **Составы муллитокорундовых материалов на основе муллитового наполнителя**

Состав	Состав шихты, мас. %				Соотношение наполнитель : связка, мас. %	
	муллит	глинозем	каолин	MgO (сверх 100 мас. %)	наполнитель	связка
1	30	44,7	25,3	1	30	70
2	50	25,0	25,0	–	50	50
3	50	32,0	18,0	–	50	50
4	50	32,0	18,0	1	50	50
5	70	19,1	10,8	1	70	30
6	50	32,0	18,0	2	50	50

Таблица 4. **Свойства муллитокорундовых образцов после обжига при 1650 °С**

Состав (см. табл. 3)	Кажущаяся плотность, г/см^3	Водопоглощение, %	Пористость, %	Усадка, %	Предел прочности при сжатии, МПа
1	2,88	4,3	12,5	6,6	133
2	2,58	8,4	21,4	1,4	69
3	2,61	8,3	21,7	2,5	55
4	2,64	7,8	20,7	2,6	77
5	2,49	9,9	24,7	2,0	25
6	2,67	7,3	19,6	2,4	92

Таблица 5. **Составы муллитокорундовых материалов на основе корундового наполнителя**

Состав	Содержание, мас. %					
	электрокорунд		глинозем марки ГН	каолин марки КЖФ	добавка (сверх 100 мас. %)	
	<0,5 мм	0,5–3,0 мм			MgO	TiO_2
1	25	–	47,9	27,1	–	–
2	–	25	47,9	27,1	2	–
3	25	–	47,9	27,1	–	–
4	25	–	47,9	27,1	2	–
5	–	25	47,9	27,1	–	–
6	–	25	47,9	27,1	–	1,5

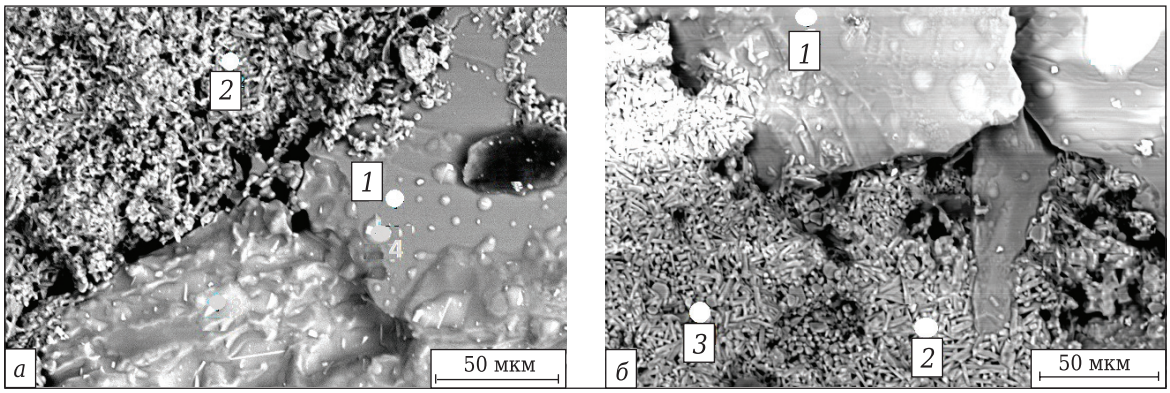


Рис. 6. Микрофотографии муллитокорундовых образцов на основе муллитового наполнителя: *а* — состав 2, ×500 (*1* — зерна наполнителя, *2* — зерна керамической связки); *б* — состав 4, ×500 (*1* — зерна наполнителя — муллит, *2, 3* — зерна керамической связки)

Экспериментальные составы синтезированы из электроплавленого корунда фракций мельче 0,5 и 0,5–3,0 мм (табл. 5). Образцы обжигали при максимальной температуре 1650 °С. Применение различных фракций электрокорунда в составе масс мало сказывалось на процессах их уплотнения (табл. 6). В то же время введение добавок MgO и TiO_2 заметно влияет на спекание, повы-

Таблица 6. **Свойства муллитокорундовых образцов на основе корундового наполнителя**

Состав	Кажущаяся плотность, г/см^3	Водопоглощение, %	Пористость, %	Усадка, %		Предел прочности при сжатии, МПа	Огнеупорность, °С
				по диаметру	по высоте		
1	2,37	13,0	31,1	0,0	0,6	254	>1700
2	2,85	5,1	14,6	5,5	7,9	328	
3	2,32	14,3	33,3	0,3	0,2	139	
4	2,90	4,4	13,9	6,9	9,9	326	
5	2,35	13,5	30,7	0,2	0,3	230	
6	2,60	9,2	23,8	2,1	3,2	301	

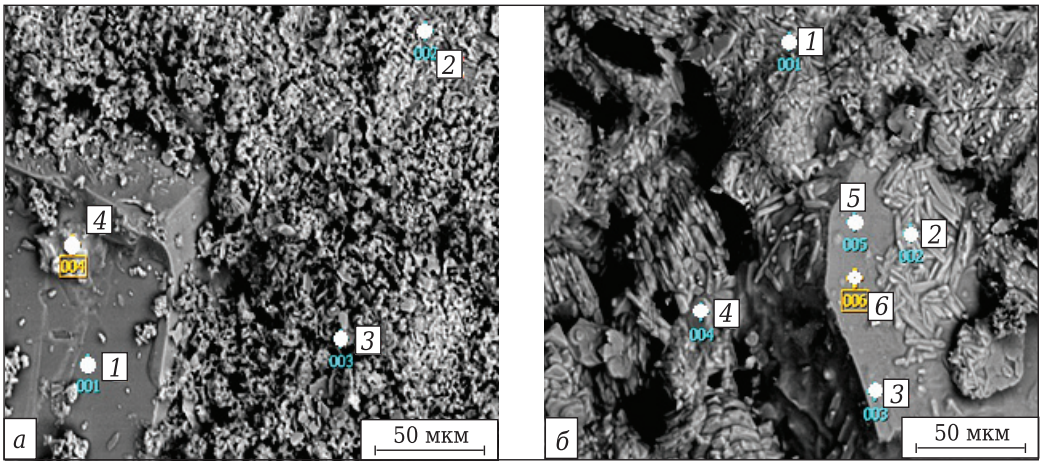


Рис. 7. Микрофотографии муллитокорундовых образцов на основе корундового наполнителя: *а* — состав 5, ×500 (*1, 4* — зерна корунда, *2, 3* — зерна керамической связки); *б* — состав 6, ×500 (*1, 2, 4* — зерна керамической связки, *3, 5, 6* — зерна наполнителя)

шая плотность образцов. Вводимые добавки прежде всего взаимодействуют с компонентами керамической связки, придавая ей активность при спекании и повышая прочность материала как за счет более интенсивного синтеза и спекания самой связки, так и за счет образования более прочных связей зерно – связка и зерно – связка – зерно. Повышенные значения плотности и прочности муллитовых образцов, синтезированных из оксидов алюминия и кремния в присутствии минерализаторов MgO и TiO_2, отмечены в статье [21]. Микроструктура образцов (рис. 7) представлена зернами электроплавленого корунда, скрепленных муллитокорундовой керамической связкой. Керамическая связка в образцах без добавок имеет мелкозернистое строение, а в модифицированных образцах кристаллы муллита имеют игольчатую форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сырьевые материалы отечественного производства, а именно: бокситогорский глинозем марки ГН, белый юргинский электрокорунд, каолин марки КЖФ, отвечают требованиям, необходимым для производства высокотемпературной термостойкой огнеупорной оснастки муллитокорундового состава с точки зрения сформированности фазового состава и минимального содержания примесей.

При синтезе муллитокорундовой керамической связки с содержанием Al_2O_3 от 72 до 80 мас. % из смеси каолина и тонкомолотого глинозема муллитообразование наблюдается в широком интервале (1100–1650 °С); при этом формируется тонкоигольчатый муллит с размерами игл 10–15 мкм и соотношением длины к диаметру 8 : 1. Введение модифицирующих добавок MgO и TiO_2 приводит к уплотнению керамической связки по сравнению с немодифицированными составами; при этом наблюдаются рост кристаллов муллита до 15–20 мкм и уменьшение отношения длины к диаметру до 5:1. При избытке Al_2O_3 по сравнению со стехиометрией в муллите (72 мас. %) наблюдаются отдельные хорошо окристаллизованные зерна корунда гексагональной пластинчатой формы размерами 5–10 мкм.

Использование электроплавленого муллита с соотношением фракций 0,45–2,00 мм : 2–5 мм, равным 1 : 3, и керамической связкой муллитокорундового состава на основе глинозема марки ГН ($d_{ср}$ = 2÷4 мкм) и каолина марки КЖФ обеспечивает получение муллитокорундовых материалов на основе муллитового наполнителя с открытой пористостью 12–21 %, пределом прочности при сжатии 50–130 МПа и огнеупорностью выше 1700 °С. Микроструктура материала представляет собой муллитовый каркас с равномерно распределенной керамической связкой, представленной игольчатым муллитом и тонкозернистым корундом.

Муллитокорундовые материалы на основе корундового наполнителя с пределом прочности при сжатии 200–300 МПа и огнеупорностью выше 1700 °С получены на основе отечественного сырья: юргинского электрокорунда с размерами зерен от 0,01 до 3,0 мм, бокситогорского глинозема марки ГН и каолина марки КЖФ. Микроструктура муллитокорундовых огнеупоров фрагментарного типа представляет собой каркас из зерен электрокорунда, скрепленный керамической связкой, представленной игольчатым муллитом и тонкозернистым корундом.

Наиболее рациональной технологией формования огнеупорных изделий простой формы и небольших размеров (стойки) является метод полусухого прессования.

Библиографический список

1. ***Кащеев, И. Д.*** Химическая технология огнеупоров / *И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин.* — М. : Интермет Инжиниринг, 2007. — 752 с.

2. ***Кащеев, И. Д.*** Свойства и применение огнеупоров / *И. Д. Кащеев.* — М. : Теплотехник, 2004. — 352 с.

3. ***Карклит, А. К.*** Производство огнеупоров полусухим способом / *А. К. Карклит, А. П. Ларин, С. А. Лосев, В. Е. Верниковский.* — М. : Металлургия, 1981. — 320 с.

4. ***Карклит, А. К.*** Огнеупорные изделия, материалы и сырье : справочник. — 4-е изд. / *А. К. Карклит, Н. М. Пориньш, Г. М. Каторгин* [и др.]. — М. : Металлургия, 1991. — 416 с.

5. ***Кайнарский, И. С.*** Процессы технологии огнеупоров / *И. С. Кайнарский.* — М. : Металлургия, 1969. — 350 с.

6. ***Карклит, А. К.*** Огнеупоры из высокоглиноземистого сырья / *А. К. Карклит, Л. А. Тихонова.* — М. : Металлургия, 1974. — 152 с.

7. ***Кащеев, И. Д.*** Огнеупоры: материалы, изделия, свойства и применение : каталог-справочник. Кн. 1 / *И. Д. Кащеев, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский.* — М. : Теплоэнергетик, 2003. — 336 с.

8. ***Горшков, В. С.*** Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений / *В. С. Горшков.* — М. : Высшая школа, 1988. — 400 с.

9. ***Семченко, Г. Д.*** Украинский дистен-силлиманитовый концентрат. Часть 3. Спекание и муллитизация проб разного размера частиц при нагревании / *Г. Д. Семченко, Д. А. Бражник, М. А. Понасенко* [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2016. — № 7/8. — С. 15–20.

10. ***Косенко, Н. Ф.*** Муллитообразующее связующее и его физико-химический анализ / *Н. Ф. Косенко, Ю. В. Филатова, Ю. В. Пимков* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2015. — № 11/12. — С. 11–16.

11. ***Седмале, Г.*** Керамика системы муллит–ZrO_2–SiAlON в процессе спекания в плазме искрового разряда (SPS) / *Г. Седмале, М. Рунданс, И. Шперберга* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 134–138.

Sedmale, G. Ceramic of the mullite–ZrO_2–SiAlON system during spark plasma sintering / *G. Sedmale, M. Rundans, I. Sperberga* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 146–150.

12. ***Шнабель, М.*** Современные представления о плавленых и спеченных огнеупорных заполнителях / *М. Шнабель, А. Бур, Д. Шмидтмайер* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 107–114.

13. ***Плетнев, П. М.*** Структурно-фазовые характеристики импортного огнеупора и муллитокорундовые составы с использованием его боя / *П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин, В. А. Богданов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 1/2. — С. 20–25.

14. ***Плетнев, П. М.*** Экспериментальные составы корундомуллитовых огнеупоров на основе отечественного сырья / *П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 3. — С. 10–14.

15. ***Тюлькин, Д. С.*** Характеристики отечественного сырья для производства термостойких высокотемпературных корундомуллитовых огнеупоров / *Д. С. Тюлькин, П. М. Плетнев* // Сборник научных трудов Международной конференции «СТРОЙСИБ 2016». Ресурсы и ресурсосберегающие технологии в материаловедении. — Новосибирск, 2016. — С. 204–209.

16. ***Мязь, А. Л.*** Оценка отечественных глиноземов в качестве сырья для конструкционной керамики / *А. Л. Мызь, Г. Р. Карагедов, Н. З. Ляхов* // Стекло и керамика. — 2016. — № 2. — С. 34–38.

17. ***Солодких, Н. Ф.*** Минерально-сырьевая база Урала для керамической, огнеупорной и стекольной промышленности : справочное пособие / *Н. Ф. Солодких, А. С. Шамриков, В. М. Погребенков.* — Томск : ТПУ, 2009. — 332 с.

18. ***Плетнев, П. М.*** Физико-химические принципы получения огнеупоров для производства технической керамики / *П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин* // Вестник СГУПС. — 2016. — № 1. — С. 21–27.

19. ***Беляков, А. В.*** Регулирование открытой пористости и прочности варьированием зернового состава керамики на основе электроплавленого корунда с фарфоровой связкой / *А. В. Беляков, Зо Е Мо У, Н. А. Попова* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 34–38.

Belyakov, A. V. Varying the granulometric composition of an electrofused-corundum-based ceramic with a porcelain binder to control its open porosity and strength / *A. V. Belyakov, Zaw Ye Maw Oo, N. A. Popova* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 77–80.

20. ***Торопов, Н. А.*** Диаграммы состояния силикатных систем : справочник. В трех выпусках. Выпуск первый. Двойные системы / *Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лапин, Н. Н. Курцева.* — Л. : Наука, 1969. — 822 с.

21. ***Прутцков, Д. В.*** Синтез и спекание муллита в присутствии минерализаторов CaO и TiO_2 / *Д. В. Прутцков, В. М. Бусько, В. Э. Сокольский* [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2016. — № 7/8. — С. 38–45. ■

Получено 15.06.17
© П. М. Плетнев, В. М. Погребенков, В. И. Верещагин, Д. С. Тюлькин, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

- В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи должен быть дополнен кратким рефератом и ключевыми словами. Для оформления рукописи используйте 12-й размер шрифта через 1,5 интервала. Рекомендованное максимальное число страниц рукописи (А4) — 15. Формулы, оформляемые отдельной строкой, должны набираться с использованием редактора формул (Equation). Использование в библиографическом списке DOI обязательно. На труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями. На графики желательно не наносить масштабную сетку (за исключением номограмм).
- В статье должны быть указаны ученая степень, адрес и телефон каждого автора. Также следует указать контактное лицо, чей E-mail будет указан при публикации. Все материалы редакция просит предоставлять в электронном виде.
- Если статья отправлена по E-mail, допускается оформление изображений в виде отдельных файлов формата TIF (цветные и тоновые — 300 dpi, штриховые — 600 dpi), JPEG, EPS. Изображения (за исключением диаграмм Exel), внедренные в файлы формата DOC, в качестве оригиналов не принимаются, как не обеспечивающие стандартного качества полиграфического исполнения.
- Представляя рукопись в редакцию, авторы передают издателю авторское право на публикацию ее в журнале. В качестве гонорара авторы могут получить оттиск своей статьи в формате PDF, который высылается первому автору или любому другому (по указанию авторов). Направление в редакцию работ, опубликованных или посланных для напечатания в редакции других журналов, не допускается.
- Статья, пришедшая в редакцию от зарубежных авторов, вначале отдается на рецензирование, редактируется, переводится на русский язык и публикуется в журнале «Новые огнеупоры». Затем статья отправляется на публикацию в журнал «Refractories and Industrial Ceramics» вместе с английской версией, присланной автором. Таким образом, конечный вариант статьи, опубликованной в журнале «Refractories and Industrial Ceramics», может немного отличаться от первоначального, присланного авторами.

RULES OF DRAWING UP OF ARTICLES

- It is necessary to state in the article the aim of the research work, to cite factual data, to give their analysis and conclusions. The text of the article should be supplemented with a short abstract and key words. To make out the manuscript, use the 12th font size in 1.5 intervals. The recommended maximum number of pages of the manuscript (A4) is 15. Formulas formed by an individual line should be typed using the Equation Editor. Please use the DOI number in the bibliographic list. Don't make references to sources which are difficult of access. Figures should be distinct, simplified and not overloaded with inscriptions. It is desirable not to scribe a graticule on the diagrams (with the exceptions of nomograms).
- Scientific degree, adress and telephone of every author should be given in the article. All the materials of the articles are required to be present to the editorial board in electronic form.
- If the article is sent by e-mail it is required to draw up the images only in the form of separate files in format TIF (tone images — 300 dpi, stroke images — 600 dpi), JPEG, EPS. Images (with the exception of Exel diagrams), introdused into files of format DOC are not accepted as originals because they don't ensure the required standard polygraphic quality.
- Providing the article to Editorial office the authors thereby convey the copyright of publication to the publisher. The authors get either one copy of the article in format PDF. It not allowed offering the Editorial office an article which has been published by other journals or was sent to other publishing houses.
- The article sent to the Editorial office by foreign author is refereed firstly by an independent reviewer. Then it is edited and red-penciled, then it is translated into Russian and published in the journal «Novye Ogneupory». Further both the article and the original author's article are sent off to be published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics». Thus the final article published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics» can vary slightly from the original variant sent by the author.

- Журнал приветствует, если авторы, в тех случаях, когда это возможно и применимо, помещают данные, подтверждающие результаты их исследований, на общедоступных ресурсах (репозиториях). Авторам и редакторам, которые не располагают предпочитаемыми репозиториями, рекомендуется ознакомиться со списком таких ресурсов, представленным издательством «Springer Nature», а также с политикой издательства в отношении исследовательских данных.

  - Список ресурсов
  http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories
  - Политика в отношении исследовательских данных
  http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq
  Общие репозитории, такие как figshare и Dryad, также могут быть использованы. Массивы данных, которым репозитории присваивают DOI (идентификаторы цифровых объектов), могут приводиться в списках цитируемых источников. Ссылки на данные должны включать минимум информации, рекомендованной DataCite: авторы, название, издатель (название репозитория), идентификатор.
  - DataCite https://www.datacite.org/

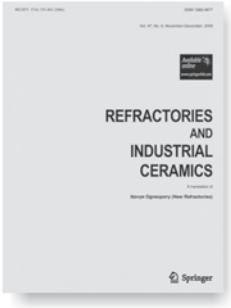
  «Springer Nature» предоставляет службу поддержки в отношении исследовательских данных для редакторов и авторов, с которой можно связаться по адресу researchdata@springernature.com. Эта служба дает рекомендации по соответствию политике в области исследовательских данных и поиску ресурсов для их размещения. Она независима от редакций журналов, книг и конференций и не дает советов по рукописям.

- The journal encourages authors, where possible and applicable, to deposit data that support the findings of their research in a public repository. Authors and editors who do not have a preferred repository should consult «Springer Nature's» list of repositories and research data policy.
  • **List of Repositories**
  http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories
  • **Research Data Policy**
  http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq
  General repositories — for all types of research data — such as figshare and Dryad may also be used.
  Datasets that are assigned digital object identifiers (DOIs) by a data repository may be cited in the reference list. Data citations should include the minimum information recommended by DataCite: authors, title, publisher (repository name), identifier.
  • **DataCite** https://www.datacite.org/

  «Springer Nature» provides a research data policy support service for authors and editors, which can be contacted at researchdata@springernature.com. This service provides advice on research data policy compliance and on finding research data repositories. It is independent of journal, book and conference proceedings editorial offices and does not advise on specific manuscripts.

ВНИМАНИЕ!

Springer



Просим в библиографическом списке статей, опубликованных в журнале «Новые огнеупоры», после русской версии дополнительно приводить библиографическое описание статьи в английской версии из журнала «**Refractories and Industrial Ceramics**» (информационно-издательский консорциум «Springer»), если она была в нем опубликована.

Содержание журнала «Refractories and Industrial Ceramics» с указанием авторов, названия статьи, года издания, номера выпуска, страниц, номера журнала публикуется в Интернете:

http://link.springer.com/journal/11148

Редакция