

Т. А. Вареникова, Е. Н. Гокова, к. т. н. В. А. Дороганов (✉),  
к. т. н. Е. А. Дороганов, д. т. н. Е. И. Евтушенко

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

УДК 666.762.1.43.2: 666.9

## ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ВЯЖУЩЕГО

Теплоизоляционные материалы корундового состава, успешно применяемые для высокотемпературной изоляции, производятся в основном методом литья, который имеет ряд существенных недостатков. Авторы настоящей статьи предлагают использовать для получения таких материалов метод вибропрессования, что позволит интенсифицировать технологический процесс производства. Приведены результаты исследования составов для получения корундовых теплоизоляционных материалов на гидравлических вяжущих. Установлены основные закономерности влияния содержания компонентов шихты на физико-механические характеристики образцов. Выявлены оптимальные составы, которые удовлетворяют требованиям ГОСТ 5040–2015.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, метод вибропрессования, высокоглиноземистый цемент, вспученный перлит.

В последнее время широкое распространение получили теплоизоляционные материалы различных составов, которые применяются в самых разных отраслях промышленности, и потребность в них постоянно увеличивается. Использование этих материалов снижает материалоемкость, экономит топливо и способствует интенсификации тепловых процессов. Поэтому теплоизоляционные изделия входят в обязательный ассортимент всех ведущих огнеупорных заводов России [1–3]. Основная тенденция развития производства новых теплоизоляционных материалов заключается в интенсификации технологических процессов, которые способствуют снижению энергозатрат и повышению качества готовой продукции. Наряду с этим актуальным становится вопрос разработки новых составов и технологии производства корундовых теплоизоляционных материалов, которые успешно применяются для высокотемпературной изоляции в металлургическом и огнеупорном производстве [4–6]. Этот вид изделий производят в основном методом литья из высокоглиноземистых дисперсных систем и выгорающих добавок с последующей продолжительной сушкой и обжигом при температурах до 1750 °С [7–10]. Присутствие большого количества влаги (до 35 %) в формовочной системе способствует существенному удлинению технологического цикла производства, а

высокая температура термообработки приводит к повышению энергозатрат. Помимо этого после обжига изделия подвергаются механической обработке для достижения заданных размеров, что также является недостатком этой технологии.

Цель настоящей работы — исследование составов масс для высокоглиноземистых теплоизоляционных материалов, производимых методом вибропрессования. Использование этого метода обеспечивает полное исключение механической обработки изделий после обжига, так как позволяет получать изделия с точными геометрическими формами. Для этого предлагается использовать формовочные системы с вяжущим на основе высокоглиноземистого цемента марки М-72 фирмы Secar с содержанием  $Al_2O_3$  не менее 73 %. В качестве сырья использовали также электроплавленный корунд (<500 мкм),  $\alpha$ -глинозем (<40 мкм) и вспученный перлитовый песок.

На первом этапе работы исследовали влияние содержания высокоглиноземистого цемента на основные физико-механические свойства высокоглиноземистых легковесных материалов составов 1–5, приведенные в табл. 1. Из составов были отформованы методом вибропрессования образцы с последующими сушкой при 100 °С в течение 6–8 ч и термообработкой при 300 и 1300 °С. На полученных образцах определяли основные физико-механические характеристики, которые показаны на рис. 1. Повышение содержания цемента с 3 до 20 % приводит к увеличению плотности  $\rho$  образцов на 7–16 % (см. рис. 1, а) в зависимости от температуры термообработки; при этом максимальной  $\rho$  0,93–1,02 г/см<sup>3</sup> характеризуются образцы с 20 % цемента (состав 5, см. табл. 1). По-



В. А. Дороганов  
E-mail: dva\_vadjik1975@mail.ru

вышение температуры предварительной термообработки также приводит к незначительному увеличению  $\rho$  материала на 5–9 %, а рост концентрации высокоглиноземистого цемента (см. рис. 1, б) — к повышению  $\sigma_{сж}$  образцов в 2–3 раза. Изменение температуры от 100 до 300 °С обеспечивает незначительный рост  $\sigma_{сж}$ , а при повышении температуры до 1300 °С  $\sigma_{сж}$  образцов увеличивается в 5–8 раз в зависимости от содержания цемента. Максимальным  $\sigma_{сж}$  (2,8–2,9 МПа) характеризуются образцы, термообработанные при 1300 °С, с 20 % цемента (состав 5, см. табл. 1). Таким образом, наиболее оптимальным составом корундового легковесного огнеупора является состав 5 (см. табл. 1). Образцы состава 5, термообработанные при 1300 °С, с 80 %  $\alpha$ -глинозема ( $Al_2O_3$  94,6 %) полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 5040–2015 и соответствуют марке КТ-1,1.

Для получения теплоизоляционных корундовых материалов марки КТ-1,3 в соответствии с ГОСТ 5040–2015 необходимо получить материал с  $\rho$  не выше 1,3 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_{сж}$  не ниже 3,5 МПа и содержанием  $Al_2O_3$  более 95 %. В этой связи на дальней-

шем этапе работы были проведены исследования, направленные на создание более прочного каркаса за счет введения в состав более крупнодисперсной составляющей в виде порошка электроплавленного корунда фракции мельче 0,5 мм. Составы образцов с электрокорундом приведены в табл. 2.

Образцы формовали и термообработывали по аналогичной методике, как и предыдущие составы. После определения основных физико-механических характеристик были построены графики зависимостей, которые показаны на рис. 2. Увеличение содержания электрокорунда до 10 % в формовочной массе (см. рис. 2, а) практически не приводит к изменению  $\rho$  образцов, которая составляет 0,90–0,97 г/см<sup>3</sup> в зависимости от температуры термообработки. При повышении концентрации электрокорунда до 15 % наблюдается незначительный рост  $\rho$  на 1–7 % до 0,97–1,04 г/см<sup>3</sup>. Повышение температуры предварительной обработки образцов приводит к росту  $\rho$  на 6–12 % во всем диапазоне содержания электрокорунда. Анализ прочностных показателей (рис. 2, б) показал, что введение

Таблица 1. Составы и свойства высокоглиноземистых составов 1–5

Номер состава	Содержание, %		Влажность массы, %	Содержание $Al_2O_3$ , %
	цемент	глинозем		
1	3	97	8,1	99,2
2	5	95	8,9	99,7
3	7	93	9,3	98,1
4	10	90	10,4	97,3
5	20	80	12,1	94,3

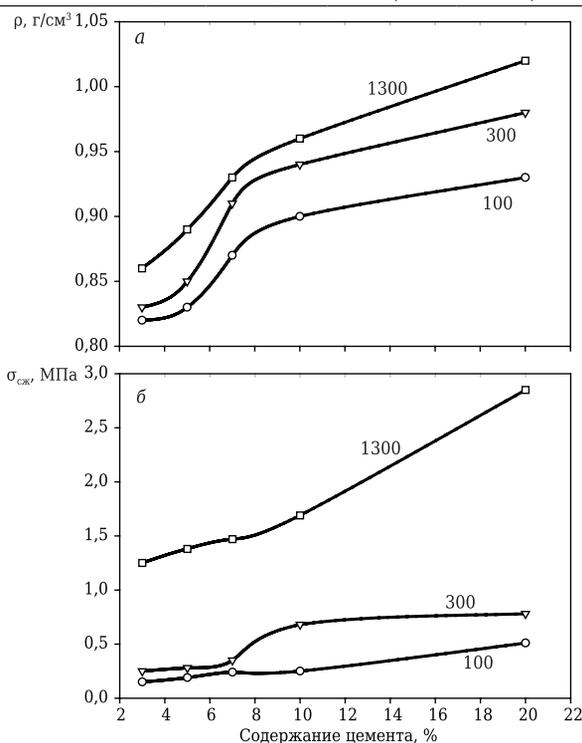


Рис. 1. Зависимости плотности  $\rho$  (а) и предела прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  (б) образцов составов 1–5 (см. табл. 1), термообработанных при различной температуре (указана на кривых, °С), от содержания цемента

Таблица 2. Составы и свойства высокоглиноземистых составов 6–9

Номер состава	Содержание, %			Влажность массы, %	Содержание $Al_2O_3$ , %
	цемент	глинозем	электрокорунд		
6	10	90	–	10,4	97,3
7	10	85	5	10,1	97,3
8	10	80	10	9,8	97,3
9	10	75	15	9,6	97,3

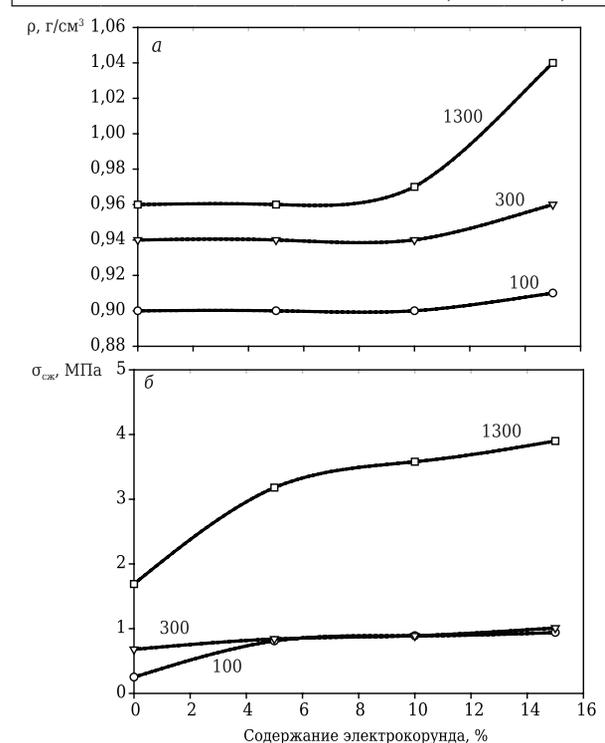


Рис. 2. Зависимости  $\rho$  (а) и  $\sigma_{сж}$  (б) образцов составов 6–9 (см. табл. 2), термообработанных при различной температуре (указана на кривых, °С), от содержания электрокорунда

электрокорунда практически не изменяет или незначительно повышает  $\sigma_{сж}$  образцов при низких температурах предварительной обработки (100–300 °С), который не превышает 1 МПа. Составы, обожженные при 1300 °С, отличаются резким повышением  $\sigma_{сж}$  (в 3–6 раз) во всем диапазоне изменения содержания электрокорунда. Максимальным значением  $\sigma_{сж}$  (3,5–4,0 МПа) характеризуются образцы с 10–15 % электрокорунда (составы 8 и 9, см. табл. 2), что соответствует изделиям марки КТ-1,3 по ГОСТ 5040–2015.

Таким образом, для достижения необходимой прочности высокоглиноземистых теплоизоляционных материалов их составы должны подвергаться термообработке при температурах не ниже 1300 °С. Для снижения температуры предварительного обжига на дальнейшем этапе были исследованы составы с добавкой вспученного перлита (табл. 3). Введение перлита взамен электроплавленого корунда позволит создать достаточно прочный каркас без увеличения плотности материала, а также за счет присутствия в составе перлита калиевого полевого шпата в виде микроклина будет способствовать достижению заданной прочности при более низких температурах обжига. На основе представленных в табл. 3 составов 10–17 по методике, описанной выше, были сформованы образцы, которые подвергались сушке и обжигу. Их основные физико-механические характеристики показаны на рис. 3. Повышение содержания вспученного перлита до 10 % приводит к снижению  $\rho$  образцов до 28 %

в зависимости от температуры термообработки, при этом минимальное значение  $\rho$  составляет 0,69–0,74 г/см<sup>3</sup> после обжига при 1300 °С (см. рис. 3, а, б). Следует отметить, что при введении в состав массы более 1 % перлита меняется характер изменения  $\rho$  образцов при повышении температуры обжига. Так, образцы состава 10 (см. табл. 3) без перлита с 10 % цемента и состава 14 (см. табл. 3) с 20 % цемента характеризуются ростом  $\rho$  на 6–9 % с повышением температуры термообработки. При концентрации перлита более 1 % у образцов всех составов  $\rho$  снижается до 14–19 % в зависимости от содержания цемента.

Анализ прочностных характеристик (см. рис. 3, в, г) показал, что увеличение концентрации перлита до 10 % приводит к существенному росту  $\sigma_{сж}$  5–6 раз в зависимости от содержания цемента и температуры предварительной термообработки. При этом максимальным  $\sigma_{сж}$  (4,5–5,0

Таблица 3. Составы и свойства высокоглиноземистых составов 10–17

Номер состава	Содержание, %			Влажность массы, %	Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
	цемент	глинозем	перлит		
10	10	90	–	10,4	97,3
11	10	85	1	14,1	96,5
12	10	80	5	15,2	93,1
13	10	75	10	16,1	88,8
14	20	80	–	12,1	94,6
15	20	79	1	14,9	93,8
16	20	75	5	16,2	90,4
17	20	70	10	16,9	86,1

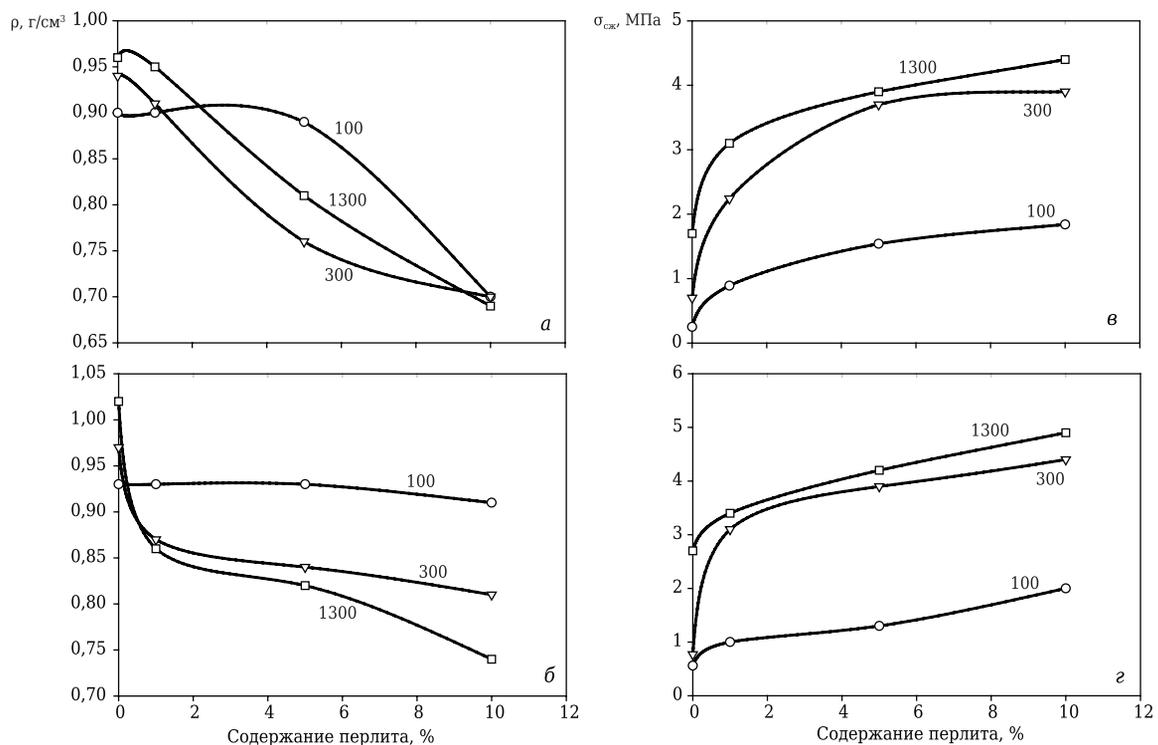


Рис. 3. Зависимости  $\rho$  (а, б) и  $\sigma_{сж}$  (в, г) образцов составов 10–17 (см. табл. 3) с добавкой 10 (а, в) и 20 % (б, г) высокоглиноземистого цемента, термообработанных при различной температуре (указана на кривых, °С), от содержания перлита

Таблица 4. Характеристики высокоглиноземистых теплоизоляционных материалов

Показатели	Требования ГОСТ 5040–2015 (КТ-1,1, МКТ-1,1)	Экспериментальные составы (12 и 16, см. табл. 3)	Показатели	Требования ГОСТ 5040–2015 (КТ-1,3)	Экспериментальные составы (8 и 9, см. табл. 2)
Массовая доля, %:			Массовая доля, %:		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	90	90–93	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	95	97,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	1,0	0,4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	0,3	0,2
SiO <sub>2</sub> , не более	–	3,7	SiO <sub>2</sub> , не более	0,5	0,1
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	1,1	0,76–0,84	Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> , не более	1,3	0,97–1,04
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	2,5	3,5–4,0	Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	3,5	3,5–4,0

МПа) характеризуются образцы с 10 % вспученного перлита (составы 13 и 17, см. табл. 3). Такое изменение прочностных показателей носит противоречивый характер, так как принято считать, что при снижении плотности материала (см. рис. 3, а, б) прочность должна уменьшаться [9]. Это, вероятнее всего, происходит в результате того, что аморфизированные частицы перлита в силу своего генезиса характеризуются очень активной поверхностью, которая способствует более полному контакту с продуктами гидратации высокоглиноземистого цемента по сравнению с частицами глинозема. Следует отметить, что повышение температуры предварительной обработки приводит к существенному росту  $\sigma_{сж}$  образцов. Так, уже при 300 °С у составов с добавкой перлита наблюдается рост  $\sigma_{сж}$  в 2–3 раза, который может достигать 4,0–4,5 МПа, что существенно превышает аналогичный показатель при данной температуре у составов без перлита (см. рис. 1, б, 2, б) и с большей  $\rho$  материала. Повышение температуры обжига образцов до 1300 °С приводит к незначительному росту  $\sigma_{сж}$  — не более чем на 30 %, что позволяет сделать вывод о целесообразном применении температуры 300 °С для предварительной термообработки образцов.

В табл. 4 представлены сопоставительные характеристики экспериментальных образцов оптимального состава и требования, предъявляемые к данному виду изделий в соответствии с ГОСТ 5040–2015. Видно, что разработанные экспериментальные составы удовлетворяют требованиям ГОСТ 5040–2015 и соответствуют маркам высокоглиноземистых теплоизоляционных огнеупоров МКТ-1,1, КТ-1,1 и КТ-1,3. При этом следует отметить, что переход от классического способа формования методом литья к вибропрессованию позволил снизить формовочную влажность более чем в 3 раза и температуру обжига до 1300 °С (на 450 °С) при получении изделий марки КТ-1,3 и более чем в 5 раз изделий марок МКТ-1,1 и КТ-1,1. Это существенно сокращает производственные затраты на весь технологический цикл.

\*\*\*

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

#### Библиографический список

1. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. — М. : Стройиздат, 1980. — 396 с.
2. Горяйнов, К. Э. Технология теплоизоляционных материалов и изделий / К. Э. Горяйнов, С. К. Горяйнова. — М. : Стройиздат, 1982. — 376 с.
3. Воронов, Г. В. Огнеупорные материалы и изделия в промышленных печах и объектах вспомогательного назначения / Г. В. Воронов, В. А. Старцев. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. — 303 с.
4. Вареникова, Т. А. Корундовые легковесные огнеупоры на основе гидравлических вяжущих / Т. А. Вареникова, В. А. Дороганов, М. А. Смирнова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 5. — С. 64–69.
5. Андрианов, Н. Т. Химическая технология керамики / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.]. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2012. — 496 с.
6. Перетоккина, Н. А. Разработка и исследование составов масс и технологии изготовления шамотных теплоизоляционных материалов / Н. А. Перетоккина, В. А. Дороганов // Новые огнеупоры. — 2011. — № 2. — С. 27–29.  
Peretokina, N. A. Development and study of the compositions of unshaped fireclay-based heat-insulating refractories and a technology for making them / N. A. Peretokina, V. A. Doroganov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 1. — P. 52–54.
7. Перетоккина, Н. А. Пенолегковесные изделия на основе диатомита / Н. А. Перетоккина, В. А. Дороганов // Новые огнеупоры. — 2011. — № 5. — С. 30–33.  
Peretokina, N. A. Lightweight foam products based on diatomite / N. A. Peretokina, V. A. Doroganov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 3. — P. 191–194.
8. Евтушенко, Е. И. Теплоизоляционные материалы на основе искусственных керамических вяжущих различного состава / Е. И. Евтушенко, Н. А. Перетоккина, В. А. Дороганов [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 6. — С. 149–151.
9. Кащеев, И. Д. Химическая технология огнеупоров / И. Д. Кащеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. — М. : Интернет Инжиниринг, 2007. — 752 с.
10. Лурье, М. А. Легковесные огнеупоры в промышленных печах / М. А. Лурье, В. П. Гончаренко. — М. : Metallurgy, 1974. — 239 с. ■

Получено 10.10.17

© Т. А. Вареникова, Е. Н. Гокова, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко, 2018 г.