

Научная статья

УДК 678.744.33

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-56-67

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ В МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В.Г. Бабашов¹, В.Г. Максимов¹, В.В. Бутаков¹, Н.М. Варрик¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Для промышленных электрических печей с рабочими температурами 1650–1800 °С потребовалось создание высокоогнеупорных материалов с хорошими теплоизолирующими свойствами. На производствах, где температуры печей более 1500 °С, используют муллитокорундовые огнеупорные материалы, содержащие кристаллические волокна из высокоглиноземистого корунда и муллита. Цель данной работы – исследование фазовых превращений и поведения экспериментального футеровочного материала производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в условиях эксплуатации печи и сравнение его свойств со свойствами аналогичного импортного материала.

Ключевые слова: футеровка печи, керамический огнеупор, муллит, усадка, волокнистая теплоизоляция

Для цитирования: Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Бутаков В.В., Варрик Н.М. Исследование фазовых превращений и образования кристаллических фаз в материалах для футеровки высокотемпературных электрических печей // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 56–67. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-56-67.

Scientific article

INVESTIGATION OF PHASE TRANSFORMATIONS AND FORMATION OF CRYSTALLINE PHASES IN MATERIALS FOR LINING HIGH-TEMPERATURE ELECTRIC FURNACES

V.G. Babashov¹, V.G. Maksimov¹, V.V. Butakov¹, N.M. Varrik¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Use of industrial electric furnaces with operating temperatures of 1650–1800 °C required development of highly refractory materials with good thermal insulation properties. In industries where furnace temperatures exceed 1500 °C, mullite-corundum refractory materials containing crystalline fibers of high-alumina corundum and mullite are applied. The purpose of this work is to study the phase transformations and behavior of an experimental lining material produced by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM under furnace operating conditions and to compare its properties with a similar imported material.

Keywords: furnace lining, ceramic refractory, mullite, shrinkage, fibrous thermal insulation

For citation: Babashov V.G., Maksimov V.G., Butakov V.V., Varrik N.M. Investigation of phase transformations and formation of crystalline phases in materials for lining high-temperature electric furnaces. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 56–67. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-56-67.

Введение

Нагревательные установки, печное и другие виды теплотехнического оборудования используются практически во всех отраслях промышленности, включая нефтегазовую, металлургическую, энергетическую и обрабатывающую отрасли. В современных теплотехнических агрегатах часто соединяются несколько видов оборудования, приборов контроля и регулирования температуры, трубопроводов для подачи топлива и удаления продуктов сгорания. Промышленные печи для термической обработки материалов имеют теплоизолированное рабочее пространство, обеспечивающее требуемые тепловые и атмосферные условия для технологического процесса. Срок службы таких печей и качество обработки в большой степени зависят от стойкости их футеровки. Повышение эксплуатационных свойств теплоизоляционных футеровочных материалов дает существенный экономический эффект за счет увеличения межремонтного срока, снижения массы и материалоемкости изоляции и повышения ее тепловых свойств [1–3].

В последние годы среди большого числа типов теплоизоляционных материалов для изготовления футеровки печей прочное место заняла волокнистая теплоизоляция благодаря своим высоким эксплуатационным свойствам: низкой теплопроводности, небольшой плотности и стойкости к различным атмосферным воздействиям [4–6].

Следует отметить, что каждый из видов теплоизоляции для промышленных печей, таких как кладка из огнеупорных блоков и кирпичей, заливки и пасты на основе огнеупорных глин, гибкие волокнистые маты и войлоки, имеют свои достоинства и недостатки, а их выбор зависит от конкретных условий применения. При высокотемпературном обжиге обрабатываемых материалов атмосфера в печи оказывает вредное воздействие на футеровку, вызывая ее деградацию, а перепады температур приводят к ее усадке и растрескиванию. В частности, при изготовлении керамических изделий алюмосиликатного состава температура их обжига должна составлять от 1600 до 1700 °С, что обуславливает одно из основных требований к огнеупорной оснастке – ее способность выдерживать под нагрузкой максимальную температуру обжига без разрушений и деформаций при циклическом режиме работы.

Монолитные огнеупоры, такие как высокоглиноземистые кирпичи, обладают высокой прочностью, однако имеют низкую стойкость к тепловому удару, что приводит к их разрушению при колебаниях температуры. Кроме того, плотная керамика, помимо повышенной массы, обладает недостаточно низкой теплопроводностью, из-за чего требуется больше энергии для поддержания требуемой температуры в печи. Как правило, высокотемпературные огнеупоры этого класса имеют муллитокорундовый состав с незначительным содержанием примесей в виде оксидов железа, калия и натрия, а также могут содержать оксид магния в качестве модифицирующей добавки [7–10]. По структуре огнеупорный керамический материал содержит зерна муллита и мелкокристаллическую фазу корунда, причем в процессе эксплуатации при нагревах происходит рекристаллизация муллита, сопровождающаяся ростом кристаллов, что приводит к постепенному снижению прочности огнеупора. Огнеупорные керамические материалы на основе оксидов алюминия и циркония также используются для создания пенокерамических фильтров для очистки расплавов металлов от неметаллических включений [11, 12].

Более эффективными материалами для изготовления футеровки стали волокнистые огнеупоры, имеющие низкую плотность при высокой термостойкости и низкой теплопроводности, их доля от общего объема применяемых теплоизоляционных материалов превышает 50 %. Разработано большое количество вариантов волокнистых огнеупоров для футеровки теплотехнических агрегатов [13–15]. В качестве волокнистого

наполнителя огнеупорных плит и блоков наиболее часто используют относительно недорогие алюмосиликатные, муллитокремнеземистые или алюмоциркониевые силикатные волокна [16].

Теплоизоляционные материалы этого типа широко представлены на рынке огнеупоров и применяются для футеровок печей. В качестве примера можно привести продукцию торговых марок Isofrac и Fiberfrac компании Unifrac (США), теплоизоляционные плиты Altraform компании Rath (ФРГ), продукцию на основе волокна торговой марки LYTX компании Luyang (КНР), а также отечественную продукцию на основе муллитокремнеземистого волокна МКРВ (производители: ООО «Корда», ООО ОТМ, АО «Подольскогнеупор», ОгнеупорЭнергоХолдинг) и др. Кроме того, российские производители создают новые виды волокнистой теплоизоляции [17–25].

Как известно, муллитокремнеземистые волокна содержат до 62 % оксида алюминия, их получают методом раздува расплава, содержащего плавленные оксиды алюминия и кремния. Введение модифицирующих добавок может повысить их рабочую температуру с 1100 до 1250 °С. Такое волокно рентгеноаморфно, однако при длительных нагревах склонно к девитрификации, в результате чего выделяются кристаллические фазы, такие как муллит и кристобалит, которые негативно влияют на гибкость и прочность волокна при сохранении теплофизических свойств [17].

Разработчики предлагают использовать волокнистую теплоизоляцию в виде «мокрого войлока», т. е. материала на основе алюмосиликатного волокна, пропитанного неорганическим связующим. Такой материал способен принимать сложную геометрическую форму и отверждаться при последующем нагреве [20]. Для этого поверхность огнеупорной панели подвергают лазерному нагреву для упрочнения поверхностного слоя [21], используют магниезальное вяжущее связующее для повышения физико-механических свойств огнеупорной волокнистой панели [23].

В настоящее время создание отечественных высокотермостойких огнеупоров с требуемым комплексом эксплуатационных свойств – актуальная задача для материаловедов. Научно-технические публикации о разработке и опробовании материалов данного класса свидетельствуют о потребностях производства огнеупоров и успешных решениях в этой области [26–30].

Для широко распространенных в последнее время электрических печей с рабочими температурами 1650–1800 °С потребовалось создание высокоогнеупорных материалов с хорошими теплоизолирующими свойствами, длительно работоспособных в условиях градиентного нагрева при данных температурах. На производствах, где используются теплотехнические агрегаты с рабочими температурами >1500 °С (например, в металлургических промышленных печах, нефтехимическом оборудовании, производстве керамических изделий), хорошо зарекомендовали себя муллитокорундовые огнеупорные материалы, содержащие кристаллические волокна из высокоглиноземистого корунда (Al_2O_3) и муллита ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). В настоящее время для таких футеровок используются жестковолокнистые блоки из дискретных волокон муллитокорундового состава (наиболее распространенные материалы поставляются из ФРГ и КНР).

Производство подобных изделий имеется и в России. Для импортозамещения широко используемого в промышленности огнеупорного материала в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология получения подобного волокна и проведено исследование его применимости при изготовлении материалов для высокотемпературных футеровок [31].

Особый интерес представляет работа футеровок такого типа при температурах >1650 °С, т. е. выше температуры начала интенсивного спекания материалов на основе

смесей муллита и корунда. Наблюдения за состоянием футеровок серийных печей с силицидмолибденовыми нагревателями с заявленной рабочей температурой 1800 °С показали, что при температурах >1650 °С (а особенно – выше 1710–1720 °С) происходит существенная усадка поверхностного слоя блоков, сопровождаемая его растрескиванием. В печах более позднего выпуска использована модифицированная конструкция горячего слоя футеровки с уменьшенным размером блоков, что снизило усадочное растрескивание, но не устранило его полностью (рис. 1). Исследование данного явления, а также определение пригодности волокна для практического применения описано далее.

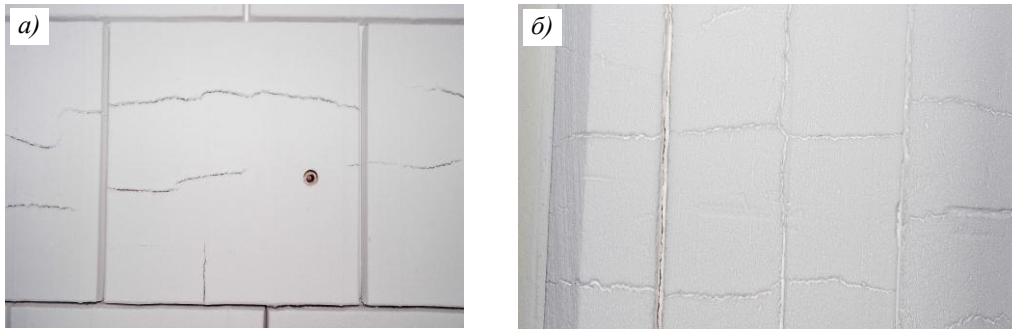


Рис. 1. Импортный футеровочный материал после термоциклирования для футеровки стенок (а) и дверцы печи (б)

Ранее авторами исследованы образцы теплоизоляционного материала на основе муллитокорундового волокна и определены его теплофизические свойства – термостойкость, усадка, прочность при сжатии при тепловом воздействии [32–34]. Цель данной работы – исследование фазовых превращений и поведения футеровочного материала в условиях эксплуатации и сравнение его свойств со свойствами импортного материала аналогичного назначения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Образцы огнеупорного материала получали из муллитокорундовых волокон производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ методом вакуумного формования с использованием различного количества кремнезоля в качестве связующего. Поливиниловый спирт применяли в качестве временного технологического связующего. Сформованные и высушенные блоки обжигали при температурах 1700 и 1750 °С. Для исследований изготавливали образцы разной плотности. Фазовый состав материала определяли методом рентгенофазового анализа. Регистрация дифрактограмм проведена при $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении в геометрии Брэгга–Брентано. Усадку определяли по ГОСТ 17177–94.

Эксперимент 1

Образцы из огнеупорного материала размером 65×65×50 мм устанавливали на необогреваемый под печи и защищали с боков блоками из аналогичного материала. Поверхность образцов и защитных блоков выравнивали подсыпкой под блоки крупного электрокорунда с величиной частиц 1 мм. Термообработку проводили по режиму: нагрев до 1750 °С за 8 ч, 3 ч выдержки и инерционное охлаждение.

Данное испытание, по мнению авторов статьи, достаточно корректно отражает условия работы материала во внутренних (высокотемпературных) слоях изоляции печей с температурой эксплуатации 1750 °С. Результаты измерения усадки, полученные при испытаниях, приведены в таблице. Высоту угасания усадки определяли по изменению геометрических размеров образца после воздействия температуры (рис. 2).

Усадка образцов материала футеровки после термообработки

Условный номер образца	Температура технологического обжига, °С	Усадка «шапки», %	Плотность, г/см ³	Высота обнуления усадки, мм
1	1700	3,5	0,28	15–18
2	1740	3	0,68	15
3	1740	2	0,58	12



Рис. 2. Профиль образца материала после градиентного нагрева (показана линия, ниже которой эксплуатационная усадка угасает)

Эксперимент 2

Определение фазового состава образцов футеровочного материала проводили с помощью рентгеновской съемки в диапазоне углов $2\theta = 15\text{--}70$ градусов. Исследовали образцы экспериментального футеровочного материала до обжига, после обжига при температуре 1740 °С и после нескольких циклов эксплуатации в печи. На рис. 3, а приведена дифрактограмма отформованного экспериментального образца до обжига. Видно, что основной фазой образца является муллит. Присутствуют пики малой интенсивности, соответствующие переходным фазам оксида алюминия – в основном $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (~10 %).

На рис. 3, б приведена дифрактограмма того же образца после обжига при температуре 1740 °С. Видно, что основной фазой образца (как и до обжига) является муллит, дополнительной фазой – корунд (~10 %). Из сравнительного анализа дифрактограмм образцов можно предположить, что при обжиге произошла рекристаллизация муллита и оксида алюминия. Мелкодисперсная фаза корунда стабилизировала рост кристаллов муллита.

На рис. 3, в приведена дифрактограмма образца после нескольких циклов эксплуатации в печи. Видно, что основной фазой образца является муллит, дополнительной фазой – корунд (чуть больше 10 %). Дифрактограмма подтверждает гипотезу о том, что мелкодисперсная фаза корунда блокирует рост кристаллов муллита и стабилизирует материал плиты. Это снижает (сводит к минимуму) усадку теплоизоляционной плиты.

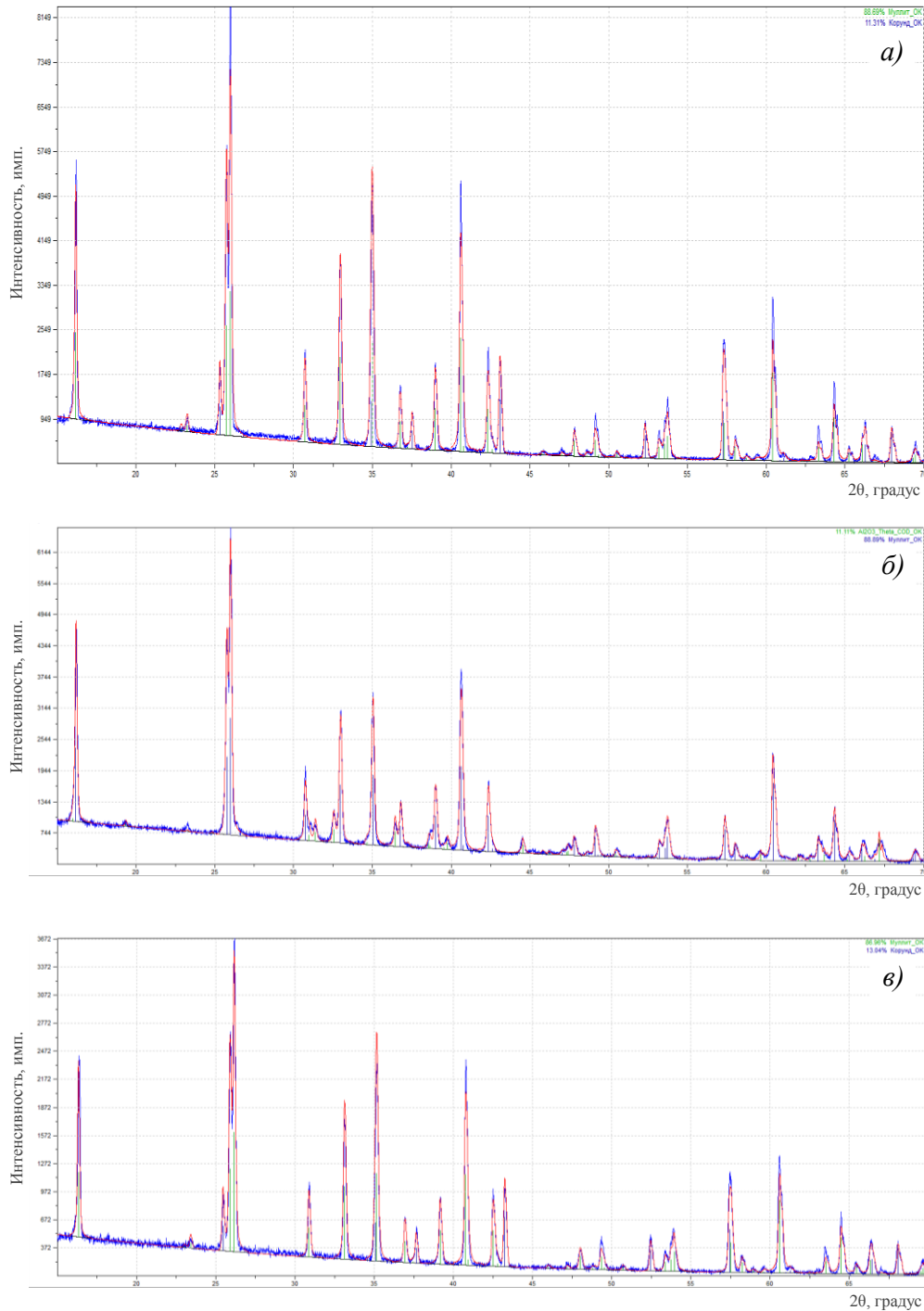


Рис. 3. Дифрактограммы образца футеровочного материала до обжига (а), после обжига при температуре 1740 °С (б) и после нескольких циклов эксплуатации в печи (в)

Эксперимент 3

Панель из материала высокой твердости (с большим количеством связующего) после обжига при температуре 1750 °С использована в качестве дверки реальной печи в течение нескольких циклов при 1750 °С с контролем температуры в объеме и на поверхности материала. Горячая поверхность материала разделена на секции на определенную в эксперименте *l* глубину угасания усадки. Состояние образца до и после испытаний можно наблюдать на рис. 4.

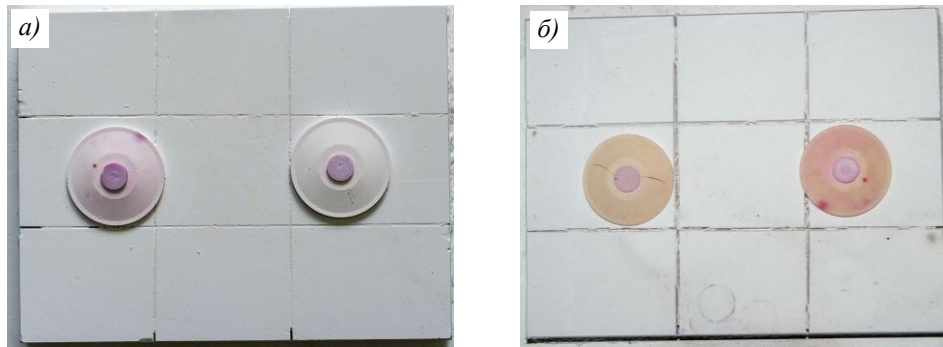


Рис. 4. Дверка печи из экспериментального футеровочного материала до (а) и после испытаний (б)

Видно, что благодаря выведению усадки в деформационные швы растрескивание на поверхности футеровочного материала отсутствует, теплоизоляционные свойства не ухудшились. На рис. 4, б видно уширение деформационных швов вследствие усадки.

Эксперимент 4

После оптимизации технологии получения экспериментальных образцов футеровочных плит из жестких волокнистых материалов изготовлена футеровка серийной печи. Используются плиты с различной плотностью и ориентацией слоев волокна по отношению к поверхности. Внутренняя поверхность плит разделена на секции. Печь с экспериментальной футеровкой подвергнута контрольному термоциклированию при температурах 1650, 1700 и 1750 °С при продолжительности пребывания при максимальной температуре 8, 10 и 2 ч соответственно.

Фотографии футеровки после термоциклирования при указанных режимах приведены на рис. 5. На рис. 5, а левая панель задней стенки выполнена из футеровочного материала с высокой твердостью, а правая – с низкой (с минимальным содержанием связующего). Заметна существенно бóльшая усадка левой панели высокой твердости по сравнению с правой низкой твердости.

Поскольку футеровка свода печи наиболее жестко нагружена как термически, так и механически, то экспериментальные панели свода имеют направление слоев материала, перпендикулярное к внутренней поверхности, остальные элементы футеровки – параллельное (более технологичное при формовке). Видно (рис. 5, б), что усадка по ширине панели существенно меньше, чем в плоскости слоев (по длине).



Рис. 5. Экспериментальные футеровочные материалы после термоциклирования в печи: а – задняя стенка; б – свод

В результате эксперимента установлено, что усадка (оцениваемая по раскрытию деформационных швов) существенно меньше на панели с минимальным количеством

связующего (правой), а перпендикулярная поверхности ориентация слоев дает явно меньшую усадку в высотном направлении, чем параллельная. Последний прием (расположение материала с ориентацией на «торец») также используется в современных модификациях печей ведущих производителей (рис. 1, б).

Результаты и обсуждение

Из проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- фазовый состав исследованных огнеупоров стабилен при эксплуатации печи в режиме циклических нагревов;
- усадка всех волокнистых материалов муллитокорундового состава при температурах выше 1650–1700 °С протекает непрерывно (не затухая) в течение всего срока службы печи и ограничивает ее ресурс;
- существенная с точки зрения эксплуатации усадка затухает на глубине 10–12 мм от поверхности;
- повышение температуры технологического обжига материала >1700 °С дает минимальный эффект с точки зрения улучшения его работоспособности, но значительно (до двух раз) увеличивает плотность и создает существенные производственные затруднения вследствие возникновения высокой технологической усадки;
- «мягкие» материалы с небольшим количеством связующего обладают существенно более благоприятным характером поверхностной усадки. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования дополнительного связующего только при необходимости существенного повышения твердости материала, например при изготовлении плит для пода;
- ориентация слоев волокон в материале перпендикулярно к поверхности позволяет значительно уменьшить отрицательные эффекты усадки;
- разделение на секции горячей поверхности футеровочных плит позволяет радикально снизить их растрескивание при циклических нагревах до температур, близких к предельной.

Заключения

Широко применяемые для футеровки печей алюмокремниевые волокна имеют высокие теплоизоляционные свойства, однако ограничения по температуре применения не более 1300 °С, обусловленные значительной усадкой и их деградацией при повышенных температурах, ставят перед материаловедами задачу получения термостойких огнеупоров для футеровки печей, рассчитанных на эксплуатацию при температурах 1700 °С и более.

В данной работе для такого применения опробован огнеупорный материал на основе муллитокорундового волокна на кварцевом связующем. Эксперименты показали, что в качестве импортозамещающего материала могут использоваться огнеупоры указанного состава. Их конструкция должна предусматривать компенсацию усадки, которая неизбежно имеет место на всем протяжении работы печи.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
2. Земляной К.Г. Служба огнеупоров: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. 172 с.

3. Стрелов К.К., Кащеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров: учеб. для средн. спец. учеб. заведений. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 528 с.
4. Мартыненко В.В., Дергапуцкая Л.А. Эффективные теплоизоляционные легковесные и волонистые огнеупоры // Огнеупоры. 1993. № 6. С. 14–21.
5. Алленштейн Й., Роучка Г., Вутнау Х. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник. Пер. с нем. М.: Интермет Инжиниринг, 2010. 392 с.
6. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: a review // Journal of Asian Ceramic Societies. 2014. Vol. 2. P. 83–96.
7. Плетнев П.М., Тюлькин Д.С. Экспериментальные составы корундомуллитовых огнеупоров на основе отечественного сырья // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 3. С. 10–14.
8. Плетнев П.М., Тюлькин Д.С. Структурно-фазовые характеристики импортного огнеупора и муллитокорундовые составы с использованием его боя // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 1–2. С. 20–25.
9. Сизов В.И., Гороховский А.М., Карпец Л.А. Применение отечественных огнеупоров для футеровки агрегатов плавки и переработки алюминия и его сплавов // Новые огнеупоры. 2006. № 4. С. 86–94.
10. Сизов В.И., Гороховский А.М., Карпец Л.А. и др. Огнеупоры для футеровки агрегатов цветной металлургии // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 8. С. 31–40.
11. Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). С. 17–25. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.
12. Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). С. 13–22. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.
13. Теплоизоляционное изделие: пат. 2467877 Рос. Федерация; заявл. 31.05.07; опубл. 10.07.10.
14. Огнеупорный теплоизоляционный материал: пат. 908782 СССР; заявл. 11.04.80; опубл. 22.08.82.
15. Fire-resistant thermal-insulation inorganic plate and preparation method thereof: pat. CN112521122; appl. 16.12.20; publ. 19.03.21.
16. Красный Б.Л., Иконников К.И., Лемешев Д.О., Сизова А.С. Оксидсодержащие минеральные волокна: виды, способы получения, применение и производители (обзор) // Стекло и керамика. 2022. Т. 95. № 1 (1129). С. 39–50. DOI: 10.14489/glc.2022.01.pp.039-050.
17. Косенко Н.Ф., Пимков Ю.В., Филатова Н.В. Влияние механической обработки на процесс девитрификации в муллитокремнеземистых волокнах // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4-5. С. 3–9.
18. Мешков В.И. Высокотемпературная волокнистая теплоизоляция компании «Unifrax», представляемая фирмой «Изомат» // Новые огнеупоры. 2006. № 4. С. 115–117.
19. Запольских И.В. Применение продукции ОАО СОЗ и МТК СЛ в различных отраслях промышленности // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 10. С. 22–29.
20. Сошкин В.Е., Байздренко В.С. Волокнистые огнеупоры для термоизоляции крышек и заслонок тепловых агрегатов // Литейное производство. 2013. № 4. С. 27–29.
21. Павлов М.Д., Окунькова А.А., Смуров И.Ю. Получение волокнистого термоизоляционного материала на основе алюмосиликатной керамики методом лазерной обработки // Перспективные материалы. 2013. № 8. С. 80–84.
22. Зубашенко Р.В. Опыт применения термостойких теплоизоляционных изделий на основе алюмосиликатного волокна в футеровке тепловых агрегатов керамической промышленности // Стекло и керамика. 2017. № 6. С. 21–23.
23. Абызов А.Н., Подкопаев В.Н., Абызов В.А., Пак Ч.Г. Разработка и исследование огнеупорного волокнистого материала на магнезиальном связующем // Огнеупоры и техническая керамика. 2010. № 1–2. С. 3–7.

24. Ковылов В.М., Томилин Ю.И., Лебедев Ю.Н., Клинов О.А. Эффективность применения волокнистых материалов и изделий в теплоограждениях печей // Новые огнеупоры. 2003. № 4. С. 22–25.
25. Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Сергиевич О.А., Погребенков В.М. Влияние модифицирующих огнеупорных и высокопрочных добавок на физико-технические характеристики муллитокордиеритовой керамики // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2-2. С. 889–894. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.889-894.
26. Керамические волокнистые теплоизоляционные плиты до 1900 °С // Компания «Термокомпоненты»: офиц. сайт. URL: <https://thermocomponents.ru/catalog/vysokotemperaturnaya-teploizolyatsiya/keramicheskie-voлокнистые-teploizolyatsionnye-plity/> (дата обращения: 29.08.2025).
27. Кондратенко А.П., Кузьмина М.Ю. Совершенствование футеровки электрических тигельных печей сопротивления за счет применения современных волокнистых огнеупорных материалов // Молодежный вестник ИрГТУ. 2023. Т. 13. № 2. С. 546–556.
28. Пашков Е.И., Пермяков М.Б., Краснова Т.В. Защита теплотехнических агрегатов в агрессивной высокотемпературной среде строительными теплоизоляционными материалами // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13. № 2. Ст. 14.
29. Мойзис Е.С., Капустин Р.Д., Илюхин М.А. Разработка и применение новых высокоэффективных конструкционных огнеупорных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 11–12. С. 34–37.
30. Аксельрод Л.М., Аникиевич И.Г., Смертин В.В., Назмиев М.И. Особенности новых разработок в области основных огнеупоров // Новые огнеупоры. 2008. № 9. С. 23–28.
31. Гращенко Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 32–35.
32. Варрик Н.М., Максимов В.Г. Исследование структурных изменений в оксидной керамике методом поляризационной микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 7. С. 29–35. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-29-35.
33. Антипов В.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Луговой А.А., Бабашов В.Г., Шавнев А.А. Изучение механических и термических характеристик пористого керамического материала на основе муллита // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). С. 38–45. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.
34. Бутаков В.В., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Оценка теплопроводности слоистого высокопористого теплоизоляционного материала // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 120–129. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-120-129.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
2. Zemlyanoy K.G. *Refractory Service: a textbook and methodological manual*. Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2018, 172 p.
3. Strelov K.K., Kashcheev I.D., Mamykin P.S. *Refractory Technology: A Textbook for Secondary Specialized Educational Institutions*, 4th ed., rev. and ad. Moscow: Metallurgiya, 1988, 528 p.
4. Martynenko V.V., Dergaputskaya L.A. Effective thermal insulation lightweight and fibrous refractories. *Ogneupory*, 1993, no. 6, pp. 14–21.
5. Allenstein J., Rouchka G., Wuthnau H. *Refractory materials. Structure, properties, testing: a reference book*: trans. from Germ. Moscow: Internet Inzhiniring, 2010, 392 p.
6. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, vol. 2, pp. 83–96.
7. Pletnev P.M., Tyulkin D.S. Experimental Compositions of Corundum-Mullite Refractories Based on Domestic Raw Materials. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2013, no. 3, pp. 10–14.

8. Pletnev P.M., Tyulkin D.S. Structural and Phase Characteristics of Imported Refractory and Mullite-Corundum Compositions Using Its Crushed Material. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2013, no. 1–2, pp. 20–25.
9. Sizov V.I., Gorokhovskiy A.M., Karpets L.A. Use of Domestic Refractories for Lining Units for Melting and Processing Aluminum and Its Alloys. *Novye ogneupory*, 2006, no. 4, pp. 86–94.
10. Sizov V.I., Gorokhovskiy A.M., Karpets L.A. et al. Refractories for lining non-ferrous metallurgy units. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2008, no. 8, pp. 31–40.
11. Deynega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narsky A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), pp. 17–25. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.
12. Deynega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narsky A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 2. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), pp. 13–22. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.
13. *Thermal insulation product*: pat. 2467877 Rus. Federation; appl. 31.05.07; publ. 10.07.10.
14. *Refractory thermal insulation material*: pat. 908782 USSR; appl. 11.04.80; publ. 22.08.82.
15. *Fire-resistant thermal-insulation inorganic plate and preparation method thereof*: pat. CN112521122; appl. 16.12.20; publ. 19.03.21.
16. Krasnyy B.L., Ikonnikov K.I., Lemeshev D.O., Sizova A.S. Oxide-containing mineral fibers: types, production methods, application, and manufacturers (review). *Steklo i keramika*, 2022, vol. 95, no. 1 (1129), pp. 39–50. DOI: 10.14489/glc.2022.01.pp.039-050.
17. Kosenko N.F., Pimkov Yu.V., Filatova N.V. Influence of Mechanical Treatment on the Devitrification Process in Mullite-Siliceous Fibers. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2013, no. 4–5, pp. 3–9.
18. Meshkov V.I. High-Temperature Fibrous Thermal Insulation by Unifrax, Presented by Izomat. *Novye ogneupory*, 2006, no. 4, pp. 115–117.
19. Zapolskikh I.V. Application of products of JSC SOZ and MTK SL in various industries. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2008, no. 10, pp. 22–29.
20. Soshkin V.E., Baizdrenko V.S. Fibrous refractories for thermal insulation of covers and dampers of heating units. *Liteynoe proizvodstvo*, 2013, no. 4, pp. 27–29.
21. Pavlov M.D., Okunkova A.A., Smurov I.Yu. Production of fibrous thermal insulation material based on aluminosilicate ceramics by laser processing. *Perspektivnye materialy*, 2013, no. 8, pp. 80–84.
22. Zubashchenko R.V. Experience in the use of heat-resistant thermal insulation products based on aluminosilicate fiber in the lining of heating units in the ceramic industry. *Steklo i keramika*, 2017, no. 6, pp. 21–23.
23. Abyzov A.N., Podkopaev V.N., Abyzov V.A., Pak Ch.G. Development and study of refractory fibrous material on a magnesia binder. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2010, no. 1–2, pp. 3–7.
24. Kovylov V.M., Tomilin Yu.I., Lebedev Yu.N., Klinov O.A. Efficiency of using fibrous materials and products in furnace thermal barriers. *Novye ogneupory*, 2003, no. 4, pp. 22–25.
25. Popov R.Yu., Dyatlova E.M., Sergievich O.A., Pogrebenkov V.M. Influence of modifying refractory and high-strength additives on the physical and technical characteristics of mullite-cordierite ceramics. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, vol. 9, no. 2-2, pp. 889–894. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.889-894.
26. *Ceramic fiber insulation boards up to 1900 °C*. Available at: <https://thermoccomponents.ru/catalog/vysokotemperaturnaya-teploizolyatsiya/keramicheskie-voloknistye-teploizolyatsionnye-plity/> (accessed: August 29, 2025).
27. Kondratenko A.P., Kuzmina M.Yu. Improving the lining of electric crucible resistance furnaces through the use of modern fibrous refractory materials. *Molodezhnyy vestnik IrGTU*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 546–556.
28. Pashkov E.I., Permyakov M.B., Krasnova T.V. Protection of heating units in an aggressive high-temperature environment with building thermal insulation materials. *Vestnik evraziyskoy nauki*, 2021, vol. 13, no. 2, art. 14.

29. Moizis E.S., Kapustin R.D., Ilyukhin M.A. Development and application of new highly efficient structural refractory materials. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2015, no. 11–12, pp. 34–37.
30. Akselrod L.M., Anikievich I.G., Smertin V.V., Nazmiev M.I. Features of New Developments in the Field of Basic Refractories. *Novye ogneupory*, 2008, no. 9, pp. 23–28.
31. Grashchenkov D.V., Balinova Yu.A., Tinyakova E.V. Ceramic Aluminum Oxide Fibers and Materials Based on Them. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 32–35.
32. Varrik N.M., Maksimov V.G. Study of Structural Changes in Oxide Ceramics by Polarization Microscopy. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 7, pp. 29–35. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-29-35.
33. Antipov V.V., Varrik N.M., Maksimov V.G., Lugovoy A.A., Babashov V.G., Shavnev A.A. Study of mechanical and thermal characteristics of a porous ceramic material based on mullite. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), pp. 38–45. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-38-45.
34. Butakov V.V., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. Assessment of thermal conductivity of a layered highly porous thermal insulation material. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 120–129. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 29, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-120-129.

Информация об авторах

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Максимов Вячеслав Геннадьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бутаков Вячеслав Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav G. Maksimov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav V. Butakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya M. Varrik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.10.2025.

The article was submitted 10.10.2025; approved and accepted for publication after reviewing 30.10.2025