

К. т. н. **Н. В. Бучилин** (✉), **Г. Ю. Люлюкина**, **Н. М. Варрик**

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП ВИАМ), Москва, Россия

УДК 666.3-127:549.731.18]:66.046.44

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОБЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛИ

Представлены результаты исследований спекания шпинельной пористой керамики с использованием оксидов алюминия и магния в качестве исходных компонентов без спекающих добавок. Показано, что оптимальный диапазон температур обжига для получения материалов с открыто-ячеистой поровой структурой составляет 1700–1730 °С. Установлено, что на механические характеристики материалов существенно влияет режим предварительной термообработки оксидов. Получены материалы с сообразующейся пористостью до 85 % и пределом прочности при сжатии до 1,0 МПа.

Ключевые слова: алюмомагнезиальная шпинель, керамические фильтры, пенокерамические материалы, высокопористые ячеистые материалы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих производственных отраслях, в частности в металлургических литейных областях промышленности, востребована высокопористая керамика — керамический материал с пористой структурой, изготавливаемый из высокодисперсных минеральных порошков или жидких пен. При обработке расплавленных металлов необходимо удалять неметаллические включения, такие как шлак, дросс, оксиды исходных материалов, образующиеся на поверхности ванны расплава, а также фрагменты огнеупорных материалов, используемых для облицовки камеры или резервуара, в которых образуется расплав металла. Пенокерамический материал благодаря низкой теплопроводности и высокой жаростойкости весьма привлекателен для использования в качестве пенокерамических фильтров, используемых как в металлургии для фильтрации и очистки расплавов металлов, так и в химической промышленности для очистки высокотемпературных потоков газов.

Пенокерамические фильтры широко применяют для отделения механических примесей от расплава металла. Однородная керамическая структура с минимумом заблокированных зон

на обеих рабочих поверхностях создает оптимальные условия для эффективной работы всех механизмов фильтрации. Удаление включений фильтрацией создает однородный расплав и, таким образом, повышает качество выпускаемой продукции, в особенности при выпуске стали, чугуна и алюминия [1–3]. Ячеистая структура пенокерамического фильтра обеспечивает глубокую фильтрацию, которая тщательно удаляет большое количество примесей, без посторонних включений. Фильтр способен выдерживать значительное статическое давление металла, сохраняя при этом эффективную фильтрацию. Пенокерамические фильтры легко пропитываются расплавленным металлом, при этом поры выступают в качестве «ловушек» для различных примесей.

Керамические фильтры получают из разных видов керамики — корундовой, алюмосиликатной, муллитовой, карбидной [4–6]. Так, фильтры из SiC на силикатной связке используют для фильтрации чугуна. Такие фильтры обладают высокой прочностью благодаря тому, что во время обжига зерна SiC в керамической массе частично окисляются до кварцевого стекла, обеспечивающего хорошую связь SiC с матрицей из силикатного связующего, создавая прочную пену. Однако при разливке чугуна образуется жидкий шлак с высоким содержанием FeO, который не смачивает фильтры из SiC из-за карботермической реакции между углеродной составляющей зерен SiC и примесями графита, из-за чего происходит прилипание шлака к фильтру [6].



Н. В. Бучилин
E-mail: isk11@yandex.ru

Фильтры на основе оксидной керамики обеспечивают эффективное удаление нежелательных примесей, особенно включений аналогичного состава — оксидных пленок и шлаков. Благодаря высокой стабильности даже при длительном воздействии высоких температур такие фильтры можно успешно применять в фильтрационных боксах или в подогревательных печах для фильтрации больших объемов жидкого металла. Керамические ячеистые пеноматериалы на основе Al_2O_3 , сочетающие высокую термостойкость, химическую стойкость к расплавам металлов и шлакам, а также низкую стоимость сырьевых компонентов, находят применение в качестве носителей катализаторов и керамических фильтров для расплавов металлов.

Наиболее распространенным способом получения пенокерамики является технология снятия реплики пены: высокопористый пенополиуретан (ППУ) пропитывают керамическим шликером, после чего сушат и обжигают [4–11]. При обжиге ППУ, находящийся внутри керамического покрытия, испаряется, и остается керамическая структура с большим количеством пор. Получение оксидной пенокерамики основано на пропитке высокопористых ППУ-каркасов шликерными суспензиями на основе порошка Al_2O_3 со спекающими добавками с последующим обжигом пропитанных каркасов при температурах порядка 1700–1850 °С. Основными требованиями к керамическим фильтрам помимо высокой термостойкости и химической стойкости к расплавам металлов являются наличие открытой пористости на уровне 80–90 % с преобладанием сообщающихся ячеистых пор и пределом прочности при сжатии не менее 0,5 МПа.

Очевидно, что подбор оптимального режима обжига имеет существенное значение в процессе производства керамических материалов, так как именно на этом этапе происходит набор прочности готового изделия. Среди явлений, протекающих при обжиге, важнейшим является процесс спекания, обусловливающий превращение пористых заготовок из конгломерата слабосвязанных частиц, объединяемых преимущественно силами трения и адгезии, в прочное тело с заданными структурой и свойствами [12–15]. В ходе спекания наблюдаются образование и рост контактов между частицами твердой фазы, уменьшение размеров пор и их числа вплоть до полного исчезновения, рекристаллизационное смещение границ между кристаллами. При этом в процессе производства высокопористых открыто-ячеистых керамических изделий очень важно добиться, с одной стороны, сохранения в готовом материале поровой структуры исходных ППУ-каркасов, а с другой — набора прочности за счет спекания частиц, находящихся в межячеистых перегородках [16–19].

При рассмотрении процессов спекания необходимо в первую очередь учитывать состояния

фаз, участвующих в спекании. Если спекание протекает в системе твердая фаза – жидкость – газ, то основная роль в механизмах переноса вещества в межзеренные поры и затягивания пор принадлежит жидкой фазе. Эту группу процессов называют «жидкофазным спеканием». Процессы спекания без участия жидкой фазы называют «твердофазным спеканием» [13, 20]. При жидкофазном спекании перенос вещества и набор прочности изделия происходят за счет вязкого течения жидкости и ее взаимодействия с твердой фазой (растворение, кристаллизация). При твердофазном спекании перенос вещества происходит за счет диффузии ионов, пластической деформации твердых частиц, процессов испарения-конденсации. Твердофазный механизм спекания требует более жестких условий обжига — повышенной температуры, давления, плотного соприкосновения спекаемых частиц, поэтому всегда является более дорогостоящим. Однако техническая керамика, получаемая по механизму твердофазного спекания, обладает высокой температурой эксплуатации и стабильностью свойств.

Настоящая работа посвящена исследованию процессов спекания и оптимизации режимов обжига керамических материалов с ячеистой поровой структурой на основе тонкодисперсных порошков Al_2O_3 и MgO с использованием спекающих добавок с целью получения керамических пенофильтров шпинельного состава, обладающих сообщающейся ячеистой пористостью выше 80 % и пределом прочности при сжатии выше 0,5 МПа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для приготовления шликерных суспензий в качестве исходных порошков использовали порошок электрокорунда марки М10 (ГОСТ 3647) со средним размером частиц 10 мкм, а также порошок оксида магния (периклаз, ГОСТ 13236) со средним размером частиц 0,1 мкм (рис. 1, 2). Шликерные суспензии готовили с использованием растворов оксихлорида алюминия, хлорида магния и воды, которые выступали в роли технологических связей при формировании заготовок и спекающих добавок при обжиге. Сырые образцы получали путем пропитки шликерной суспензией ППУ-блоков с открыто-ячеистой поровой структурой размерами 7×4×2 см с последующим отжигом избытка шликера. Образцы обжигали в электрической печи Nabertherm НТ 16/18 в интервале 1500–1750 °С в неизотермических условиях: нагрев образцов в печи, выдержка при заданной температуре, инерционное охлаждение с печью.

Фазовый состав материалов определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, съемку образцов проводили при $Cu K_{\alpha}$ -излучении в интервале углов $2\theta = 20 \div 80$ град по точкам с шагом 0,05 град и экспозицией в каждой точке 2 с. Для идентификации фаз полученные диф-

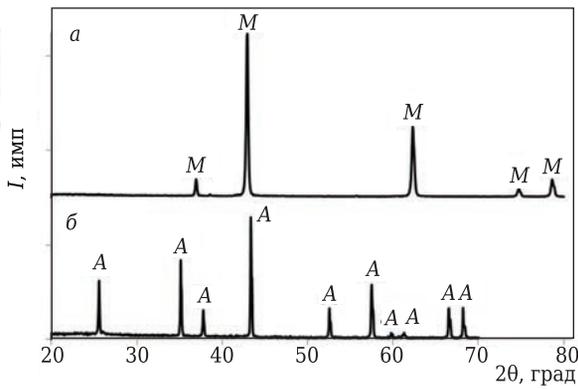


Рис. 1. Дифрактограммы исходных сырьевых материалов: а — оксид магния (M); б — корунд (A)

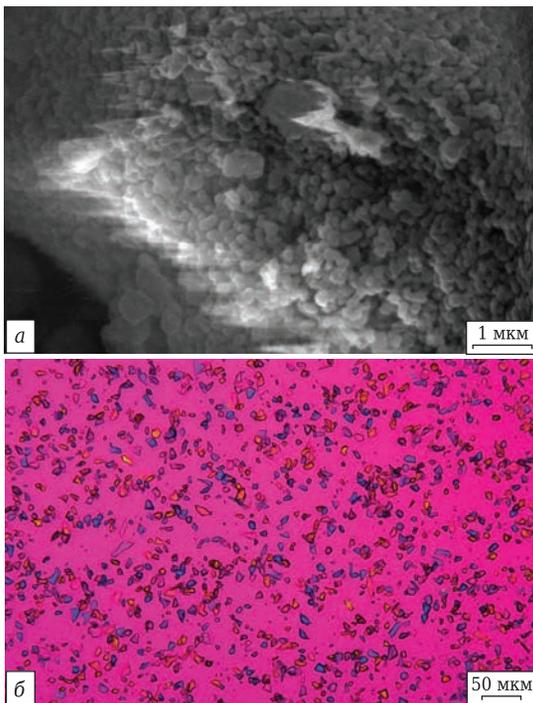


Рис. 2. Исходные порошки оксидов магния и алюминия: а — оксид магния, СЭМ; б — корунд, оптическая микроскопия, проходящий свет, поляризатор + анализатор

рактограммы сопоставляли с данными таблиц PDF2. Оптическую микроскопию в проходящем и отраженном свете проводили на микроскопе Olympus VX-51, сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) — на микроскопе Hitachi S-405A при ускоряющем напряжении 25 кВ. Предел прочности при сжатии материалов измеряли на установке Instron 5965.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По данным рентгенофазового анализа порошки представляют собой корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и кубический оксид магния без заметных примесей (см. рис. 2). Отсутствие в порошках посторонних включений подтверждается также данными оптической и электронной микроскопии (см. рис. 2, а).

Как правило, спекание грубозернистой керамики из чистых порошков оксидов магния и алюминия происходит по твердофазному механизму при температурах порядка 1500–1950 °С в течение нескольких часов, и для снижения температуры обжига изделий в состав массы вводят спекающие добавки. Результаты исследований показали, что при введении в состав керамических шликеров только воды интенсивного набора прочности керамических материалов при обжиге не происходит. Приемлемые значения прочности материалов в пределах 0,5–1,0 МПа при сохранении пористости на уровне 85 % и отсутствии деформации достигаются при введении в состав шликеров водных растворов оксихлорида алюминия и хлорида магния концентрацией 20 мас. %, взятых в шпинельном соотношении. Поэтому при дальнейшем синтезе материалов использовали только водные растворы оксихлорида алюминия и хлорида магния.

В результате варьирования температурно-временного режима обжига образцов было выявлено, что при температурах не выше 1400 °С и продолжительности обжига менее 1 ч в материалах присутствуют только исходные $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и MgO, т. е. сохраняется матричная структура исходных компонентов, а при 1500 °С происходит интенсивное образование шпинели с сохранением следов оксидов алюминия и магния (рис. 3). Варьирование температурно-временного режима обжига материалов показало, что выше 1400 °С происходит интенсивное спекание с залечиванием микропор в межъячейстых перегородках, в результате чего микропористость в межъячейстом пространстве керамики уменьшается до менее 75 %. Ниже 1300 °С спекания частиц не происходит и, как следствие, в материале отсутствует набор прочности (рис. 4, а). Установлено, что оптимальными значениями прочности на уровне 0,7–1,0 МПа и общей пористости 85 % обладают материалы, полученные при температуре обжига 1700 °С и продолжительности обжига 2 ч.

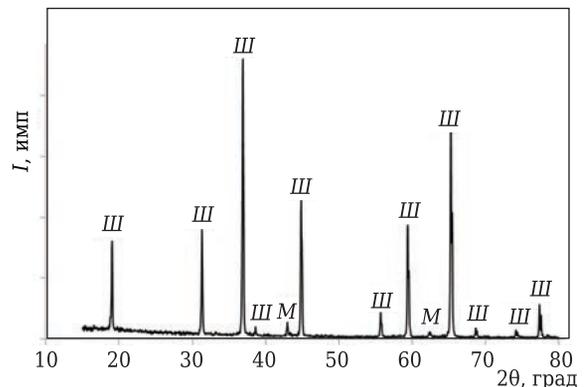


Рис. 3. Дифрактограмма керамических материалов (температура обжига 1700 °С, продолжительность 2 ч): М — MgO; Ш — алюмомагнезиальная шпинель ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)

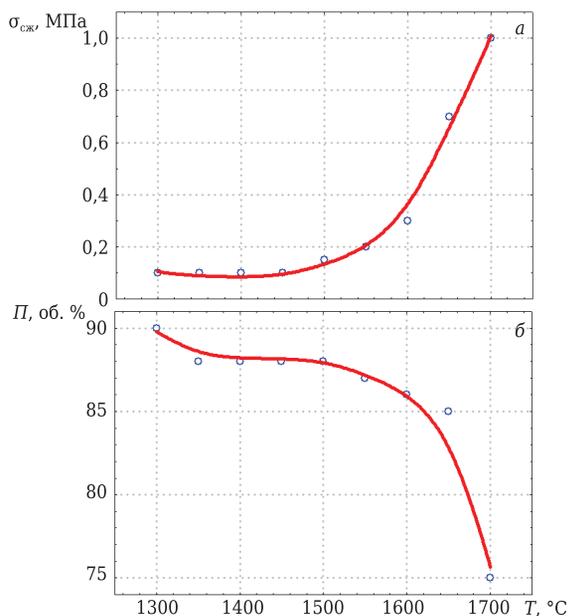


Рис. 4. Влияние температуры обжига T на технологические характеристики материалов: a — прочность при сжатии $\sigma_{сж}$; b — пористость

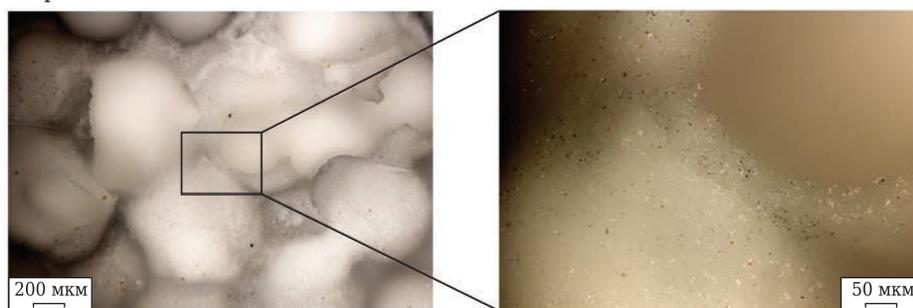


Рис. 5. Поровая структура керамических пеноматериалов (оптическая микроскопия, отраженный свет, темное поле, температура обжига 1700 °С, продолжительность 2 ч)

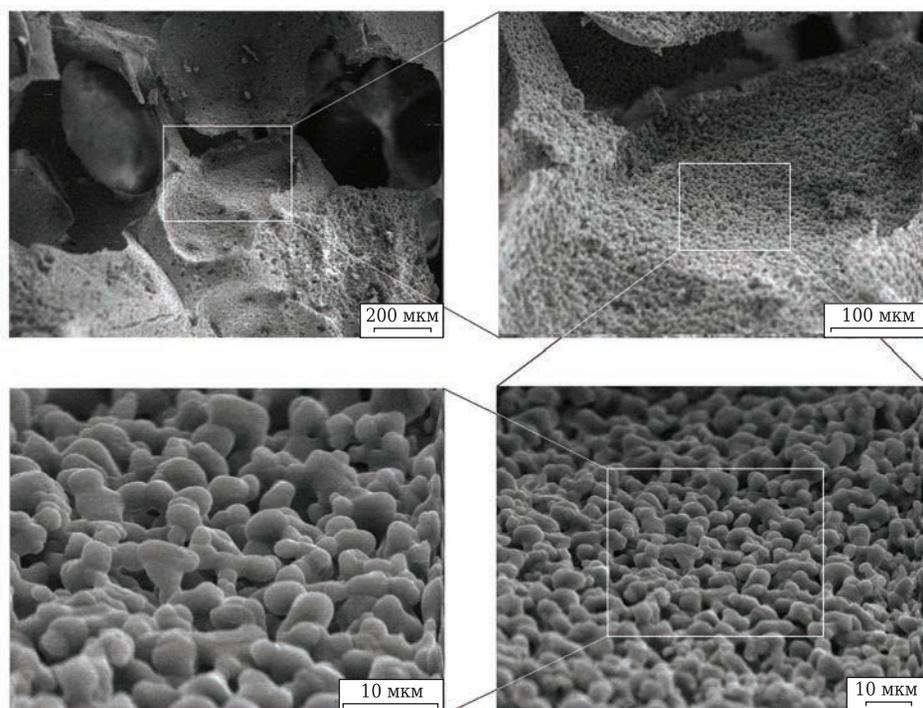


Рис. 6. СЭМ-микрофотографии образца пенокерамики (температура обжига 1700 °С, продолжительность 2 ч)

СЭМ-исследования структуры образцов, имеющих оптимальное соотношение прочности и пористости, показали, что они обладают открыто-ячеистой поровой структурой, повторяющей поровую структуру исходных ППУ-каркасов (рис. 5, 6), и размеры ячеистых макропор 0,5–2,0 мм. Межпоровые перегородки керамических материалов состоят из спекшихся зерен размерами 1–10 мкм (см. рис. 6). В самих межпоровых перегородках присутствуют микропоры размерами порядка 1–20 мкм, обусловленные наличием пустот между спекшимися зернами. При этом материалы не содержат пор, образованных за счет рекристаллизации спекаемых частиц. Перегородки не содержат также сквозных пустот, которые могут оставаться в материалах на месте выгорающего при обжиге ППУ [20], что свидетельствует о возможности получения керамических пенофильтров по предлагаемому в настоящей работе методу.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задача настоящей работы — получение керамических материалов шпинельного состава ($MgO \cdot Al_2O_3$), обладающих открыто-ячеистой поровой структурой с объемной долей сообщающихся пор 85–90 % и пределом прочности при сжатии 0,5–1,0 МПа. При этом желательны проведение обжига при температурах ниже 1750 °С. Для решения этой задачи предложен способ получения материалов путем спекания высокодисперсных порошков оксидов магния и алюминия, взятых в шпинельном соотношении, что должно обеспечить ускоренное протекание спекания по твердофазному механизму. Для синтеза керамики с заданной поровой структурой использовали метод пропитки шликером ППУ-каркасов, а для достижения указанных температур обжига в состав материалов вводили спекающие добавки. В ряде работ [9, 17, 21, 22] показана высокая эффективность использования добавок, ускоряющих процесс твердофазного спекания корундовой и диоксидциркониевой керамики при достижении температур обжига порядка 1550–1600 °С.

Полученные в настоящей работе результаты показали эффективность использования добавок на основе оксихлорида алюминия и хлорида магния, механизм действия которых основан на ускорении диффузионных процессов на поверхности частиц корунда и магнезии. Эффективная работа таких добавок при обжиге связана с тем, что они действуют как склеивающие компоненты и создают между спекаемыми частицами плотные контакты с большой площадью соприкосновения [9, 10]. Использование хлорида магния и оксихлорида алюминия обеспечивает также ускорение спекания за счет дополнительного образования оксидов алюминия и магния, а также шпинели на границах зерен спекаемых порошков за счет химических реакций между хлоридами и кислородом воздуха. Как следствие, в процессе спекания улучшается начальное припекание частиц, в результате чего происходит набор прочности готового керамического изделия [16].

При отсутствии в шликерах спекающих добавок в процессе обжига в выбранном температурном диапазоне (1600–1700 °С) материалы не набирали прочность, так как затруднена диффузия ионов между спекаемыми частицами из-за наличия в их кристаллических решетках направленных химических связей и, как следствие, затруднения ориентации движения отдельных элементов решетки. По данным [13], при отсутствии в составе керамической массы спекающих добавок условия твердофазного спекания реализуются только при обжиге плотной керамики, получаемой прессованием сухих либо увлажненных порошков. Поэтому при использовании воды в качестве технологической связки между спекаемыми

частицами отсутствовали контакты, что препятствовало набору прочности керамических изделий в процессе обжига.

При температурах обжига порядка 1700–1730 °С и увеличении его продолжительности до 3 ч происходит образование шпинели за счет химического взаимодействия между частицами корунда и оксида магния. Таким образом, межпоровые перегородки, образующие керамический каркас, представляют собой спекшиеся зерна шпинели размерами 1–10 мкм, что соответствует размерам зерен исходного корунда в сырой заготовке. При термообработке материалов происходит диффузия субмикронных зерен магнезии в более крупные зерна корунда с образованием зерен шпинели, сохраняющих размеры зерен корунда. При этом взаимная диффузия двух оксидов способствует спеканию частиц и образованию керамического каркаса. Межпоровые перегородки материалов обладают микропористостью, так как они образованы за счет пустот между спекаемыми частицами оксида алюминия, оксида магния и шпинели. При этом в обожженном материале остаются не только замкнутые микропоры, но и открытые, так как в выбранном температурном интервале получения материалов недостаточно сил диффузии для полного спекания частиц.

Возможность использовать в качестве источника шпинели тонкодисперсных порошков оксидов алюминия и магния позволяет снизить стоимость пенокерамических изделий. Кроме того, используя такое сырье, можно не проводить его механоактивацию путем предварительного помола, а использовать измельченные порошки, взятые в шпинельном соотношении, что обеспечит в готовых пенофильтрах развитую пористость в перегородках между макропорами за счет пустот между спеченными частицами, а также отсутствие в составе материала фаз исходных компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали возможность получения на основе оксидов алюминия и магния керамических пенофильтров шпинельного состава, обладающих ячеистой поровой структурой, открытой пористостью до 85 % с пределом прочности при сжатии до 0,6–1,0 МПа. Оптимальным режимом получения таких материалов является обжиг при 1700–1730 °С в течение 2 ч при содержании до 20 мас. % хлорида магния и оксихлорида алюминия в составе исходных шликеров. Для достижения в материалах наибольших значений прочности и снижения температуры обжига требуются дальнейшая оптимизация состава керамической массы подбором спекающих добавок и варьированием фракционного состава спекаемых порошков, а также оптимизация состава шликерных суспензий подбором электролитов, позволяющих увеличить в шликере объемную долю

твердой фазы и соответственно число контактов между спекаемыми частицами при обжиге.

Библиографический список

1. **Каблов, Е. Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / *Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии.* — 2015. — № 1 (34). — С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. **Бунтушкин, В. П.** Сплавы на основе алюминидов никеля / *В. П. Бунтушкин, Е. Н. Каблов, О. А. Базылева, Г. И. Морозова // МиТОМ.* — 1999. — № 1. — С. 32–34.
3. **Каблов, Е. Н.** Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения / *Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис // Авиационные материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 36–51.
4. **Пат. 2084428 Российская Федерация.** Шликер для изготовления пенокерамических фильтров / *Опалейчук Л. С., Озерова И. В., Веричев Е. Н., Корышев А. Е.*; патентообладатель АО «Строймашкерамика». — № 93008852/03; заявл. 18.02.93; опубл. 20.07.97.
5. **Пат. 2380138 Российская Федерация.** Усовершенствованный пенокерамический фильтр для улучшения фильтрования расплавленного чугуна / *Обри Л. С., Ольсон Р. А., Плэнтек К. Дж., Редден М. К., Хоак Д. П., Чи Ф.*; патентообладатель — Порвэйк Пи Эл Си. — № 2008108220/15; заявл. 04.08.06; опубл. 27.01.10, Бюл. № 3.
6. **Пат. 6663776 США.** Высокопрочный SiC-фильтр и способ его изготовления / *Ольсон Р. А., Обри Л. С., Чи Ф., Плэнтек К. Дж., Редден М. К., Хоак Д. П.*; патентообладатель — Порвэйк Пи Эл Си. — № 10/256844; заявл. 27.09.2002; опубл. 16.12.2003.
7. **Пат. 2456056 Российская Федерация.** Керамический фильтр, содержащий углеродное покрытие, и способ его изготовления / *Лю Ц., Чжу Ц., Шэнь Ш.*; патентообладатель — Цзинань Шэнцюань групп Шеахолдинг Со., Ltd. — № 2010118514/03; заявл. 28.01.08; опубл. 20.07.12, Бюл. № 20.
8. **Анциферов, В. Н.** Проблемы порошкового материаловедения. Часть II / *В. Н. Анциферов.* — Екатеринбург : УрО РАН, 2002. — 263 с.
9. **Sandoval, M. L.** Foaming performance of aqueous albumin and mullite-albumin systems used in cellular ceramic processing / *M. L. Sandoval, M. A. Camerucci // Ceram. Int.* — 2014. — № 40. — P. 1675–1686.
10. **Magnani, G.** Pressureless sintered silicon carbide with enhanced mechanical properties obtained by the two-step sintering method / *G. Magnani, A. Brentari, E. Burrelli, G. Raiteri // Ceram. Int.* — 2014. — № 40. — P. 1759–1763.
11. **Yang, W.** Effect of negatively charged ions on the formation of microarc oxidation coating on 2024 aluminium alloy / *W. Yang, B. Jiang, A. Wang, H. Shi // J. Mater. Sci. Technol.* — 2012. — № 28 (8). — P. 707–712.
12. **Aminzare, M.** Sintering behavior of nano alumina powder shaped by pressure filtration / *M. Aminzare, M. Mazaheri, F. Golestanifard [et al.] // Ceram. Int.* — 2011. — № 37. — P. 9–14.
13. Химическая технология керамики : уч. пособие для вузов ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : РИФ Стройматериалы, 2003. — 496 с.
14. **Каблов, Е. Н.** Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и ке-

- рамических композиционных материалов / *Е. Н. Каблов, Б. В. Щетанов, Ю. А. Ивахненко, Ю. А. Балинова // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн.* — 2013. — № 2. — Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.12.2017).
15. **Щетанов, Б. В.** Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / *Б. В. Щетанов, Ю. А. Балинова, Г. Ю. Люлюкина, Е. П. Соловьева // Авиационные материалы и технологии.* — 2012. — № 1. — С. 13–18.
16. **Уварова, Н. Е.** Высокотемпературные радиопрозрачные материалы: сегодня и завтра / *Н. Е. Уварова, Д. В. Гращенков, Н. В. Исаева [и др.] // Авиационные материалы и технологии.* — 2010. — № 1. — С. 16–21.
17. **Балинова, Ю. А.** Физико-химические свойства многокомпонентных растворов для керамических материалов, содержащих поливиниловый спирт / *Ю. А. Балинова, Т. А. Кириченко // Авиационные материалы и технологии.* — 2014. — № 1. — С. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-34-38.
18. **Никитина, В. Ю.** Способы определения площади сечения монокристаллических волокон Al_2O_3 для расчета прочности при растяжении / *В. Ю. Никитина, С. Г. Кольшев, Р. С. Купцов // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн.* — 2014. — № 2. — Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-3-3.
19. **Балинова, Ю. А.** Особенности формирования $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в поликристаллических волокнах с содержанием оксида алюминия 99 % в присутствии добавок Fe_2O_3 , MgO , SiO_2 / *Ю. А. Балинова, Т. М. Щеглова, Г. Ю. Люлюкина, А. С. Тимошин // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн.* — 2014. — № 3. — Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-3-3.
20. **Евтеев, А. А.** Керамика в системе $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с добавками эвтектических составов / *А. А. Евтеев, Н. А. Макаров, Д. О. Лемешев, С. В. Житнюк // Стекло и керамика.* — 2011. — № 8. — С. 23–27.
21. Технология стекла ; под ред. И. И. Китайгородского. — 3-е изд. — М. : Гос. изд-во лит-ры по стр-ву, архитектуре и строительным материалам, 1961. — 517 с.
22. **Бучилин, Н. В.** Реологические характеристики шликерных суспензий на основе оксида алюминия / *Н. В. Бучилин, Е. П. Прагер // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн.* — 2015. — № 5. — Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-6-6.
23. **Vogt, U. F.** Improving the properties of ceramic foams by a vacuum infiltration process / *U. F. Vogt, M. Gorbar, P. Dimopoulos-Eggenschwiler [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc.* — 2010. — № 30. — P. 3005–3011.
24. **Евтеев, А. А.** Расчет оптимальных режимов обжига керамики на основе оксидов циркония и алюминия / *А. А. Евтеев, Д. О. Лемешев, С. В. Житнюк, Н. А. Макаров // Стекло и керамика.* — 2014. — № 8. — С. 15–21.
25. **Бакунов, В. С.** Особенности спекания оксидной керамики / *В. С. Бакунов, Е. С. Лукин // Стекло и керамика.* — 2011. — № 7. — С. 9–13. ■

Получено 13.04.18

© Н. В. Бучилин, Г. Ю. Люлюкина, Н. М. Варрик, 2019 г.