

УДК 666.77

ОСОБЕННОСТИ СПЕКАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al_2O_3 – MgO

© 2020 г. Н. В. Бучилин¹, *, О. В. Басаргин¹, Н. М. Варрик¹, А. А. Луговой¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
ул. Радио, 17, Москва, 105005 Россия

*e-mail: isk11@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 04.10.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Исследован процесс спекания керамических образцов на основе оксида магния, оксида алюминия и алюмомагниевого шпинели для установления принципиальной возможности получения пенокерамических материалов системы Al_2O_3 – MgO , а также изучено влияние спекающих добавок на процесс спекания. Определен диапазон температур, обеспечивающий получение материалов с открытоячеистой поровой структурой, оптимальная температура составила 1600–1700 °С. Пористость полученных материалов составляла до 85%, прочность при сжатии – до 1.4 МПа.

Ключевые слова: оксидная керамика, шпинель, оксид алюминия, оксид магния, керамические фильтры, спекание

DOI: 10.31857/S0002337X2004003X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высокопористые керамические материалы вызывают интерес разработчиков, так как на них существует спрос в различных областях промышленности. Благодаря низкой плотности, низкому коэффициенту термического расширения, стойкости к термоудару, хорошей химической стойкости, огнеупорности и высоким механическим свойствам такие материалы используют в качестве носителей катализаторов, высокотемпературных тепло- и звукоизоляционных материалов, а также высокотемпературных фильтров для расплавов металлов и горячих жидкостей и газов и основы для аблирующих композиций [1–3].

В последнее время при получении высокопористой пенокерамики набирает популярность способ пропитки шликерными суспензиями пенополиуретановых (ППУ) каркасов губчатой структуры с последующей их высокотемпературной термообработкой (обжигом). При обжиге происходят спекание частиц порошка, входящего в состав шликера, удаление ППУ-каркаса и, как следствие, образование высокопористого керамического материала, повторяющего форму исходной губчатой ППУ-структуры [4–8]. Для получения высокопористых структур, имеющих в своем составе прочные низкопористые перегородки между макропорами, необходим тщательный подбор компонентов керамики и технологических параметров обжига.

По химическому составу керамические пеноматериалы в основном представляют собой оксидную керамику (как правило, на основе Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2) или карбидную керамику (на основе карбида кремния).

Среди керамических пеноматериалов на основе тугоплавких оксидов наибольшее применение находит керамика на основе оксида алюминия и муллита. Такая керамика обладает высокой термостойкостью и химической стойкостью, особенно к окислению, при этом исходные компоненты для получения алюмооксидной керамики недороги и доступны. Стабильность при длительном воздействии высоких температур позволяет успешно применять алюмооксидную пористую керамику в фильтрационных боксах или в печах подогрева для фильтрации больших объемов жидкого металла. Для такого использования необходимыми условиями являются наличие открытой пористости на уровне 80–90% с преобладанием сообщающихся ячеистых пор и прочность при сжатии не менее 0.5 МПа.

В то же время, для создания подложек катализаторов и пенофильтров перспективна керамика на основе оксида магния (жженой магнезии) и алюмомагниевого шпинели. Такая керамика также характеризуется высокой химической стойкостью и стойкостью к воздействию высоких температур. Состав природных шпинелей колеблется в широких пределах. Кроме того, природные шпинели всегда содержат некоторое количество примесей. Чистые шпинели получают синтезом из

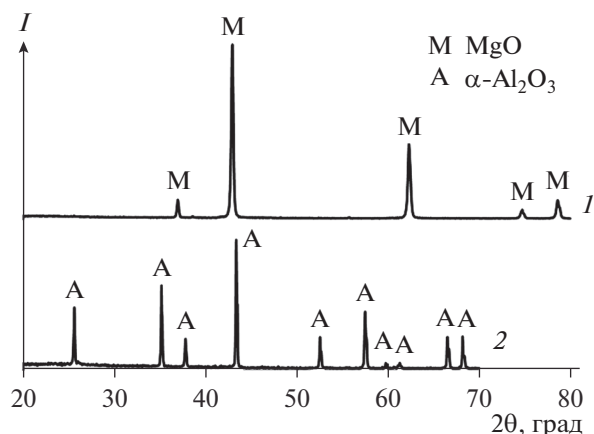


Рис. 1. Диффрактограммы исходных компонентов: 1 – оксид магния, 2 – корунд.

соответствующих оксидов. Из чистых соединений этого класса чаще всего применяют шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ с кубической решеткой, которая весьма стойка к действию шлаков и флюсов. Исследование керамических материалов на основе шпинели может дать ключ к решению многих проблем высокотемпературного шлакования в сталеварении и при литье изделий из алюминия.

Небольшие количества магнезиальной шпинели получают сплавлением жженой магнезии и глинозема в электродуговых печах. Ограниченное применение получили спеченные смеси MgO с Al_2O_3 , хотя спекание этих оксидов не особо практично для производства плотной низкопористой керамики [9, 10]. Спекание MgO с Al_2O_3 сопровождается значительным объемным изменением, образование шпинели на границах спекаемых зерен раздвигает их. Такое расширение нельзя предотвратить, так как плотность шпинели значительно меньше плотности образующих ее оксидов. Но следует отметить, что расширение, происходящее при спекании MgO с Al_2O_3 , приносит пользу при производстве пористых керамических материалов, например набойки для сталеплавильных индукционных печей. Тем не менее, производство технических огнеупоров из чистой магнезиальной шпинели весьма невысоко вследствие больших расходов, с которыми сопряжен выпуск продукции высокой степени чистоты, способной конкурировать с прочими огнеупорами.

Как правило, спекание грубозернистой керамики из чистых порошков оксида магния и алюминия происходит по твердофазному механизму, т.е. за счет взаимной диффузии ионов между спекаемыми частицами порошка при температурах порядка 1500–1950°C в течение нескольких часов, и для снижения температуры обжига изделий в состав массы вводят спекающие добавки. Следует отметить, что оксиды магния и алюминия являются спекающими добавками друг относительно друга, т.е. как введение оксида магния в состав корундовой керамики, так и введение оксида алюминия в состав

магнезиальной керамики способствуют ускорению процесса спекания и, соответственно, позволяют снизить температуры обжига керамических изделий. Ранее [11] были синтезированы высокотемпературные керамические пеноматериалы на основе муллита путем обжига соответствующих тонкодисперсных порошков на выгорающей вспененной основе и показана принципиальная возможность получения таких материалов.

Настоящая работа посвящена исследованию процессов спекания и оптимизации режимов обжига керамических образцов на основе тонкодисперсных порошков оксида магния и оксида алюминия с использованием спекающих добавок с целью получения керамических пеноматериалов, обладающих сообщающейся ячеистой пористостью выше 80% и прочностью при сжатии выше 0.5 МПа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления шликерных суспензий в качестве исходных компонентов использовали порошок электрокорунда марки М5 (ГОСТ 3647-80) со средним размером частиц 5 мкм, а также порошок оксида магния (периклаз) (ГОСТ 13236-83) со средним размером частиц 1 мкм (рис. 1, 2).

Шликерные суспензии готовили с использованием водных растворов оксихлорида алюминия и хлорида магния. Эти соединения играют роль технологических связок при формовании заготовок и спекающих добавок при обжиге.

Сырые образцы получали путем пропитки шликерными суспензиями ППУ-блоков с открытоячеистой поровой структурой с размерами ячеистых пор 0.5–2.0 мм с последующим отжимом избытка шликера. Обжиг образцов осуществляли в электрической печи Nabertherm HT 16/18 в интервале температур 1000–1700°C в неизотермических условиях: нагрев образцов в печи, выдержка при заданной температуре, инерционное охлаждение с печью.

Фазовый состав образцов определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (Cu-излучение в интервале углов $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$ по точкам с шагом 0.05° и экспозицией в каждой точке 2 с). Для идентификации фаз полученные диффрактограммы сопоставляли с данными таблиц PDF2. Оптическую микроскопию в проходящем и отраженном свете проводили на микроскопе Olympus VX-51, сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) на электронном микроскопе Hitachi S-405A при ускоряющем напряжении 25 кВ. Прочность материалов при сжатии измеряли на установке Instron 5965.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

По данным рентгенофазового анализа, исходные порошки представляют собой корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) и кубический оксид магния (MgO) без рентгенографически заметных примесей (рис. 1). Отсутствие в порошках посторонних включений также

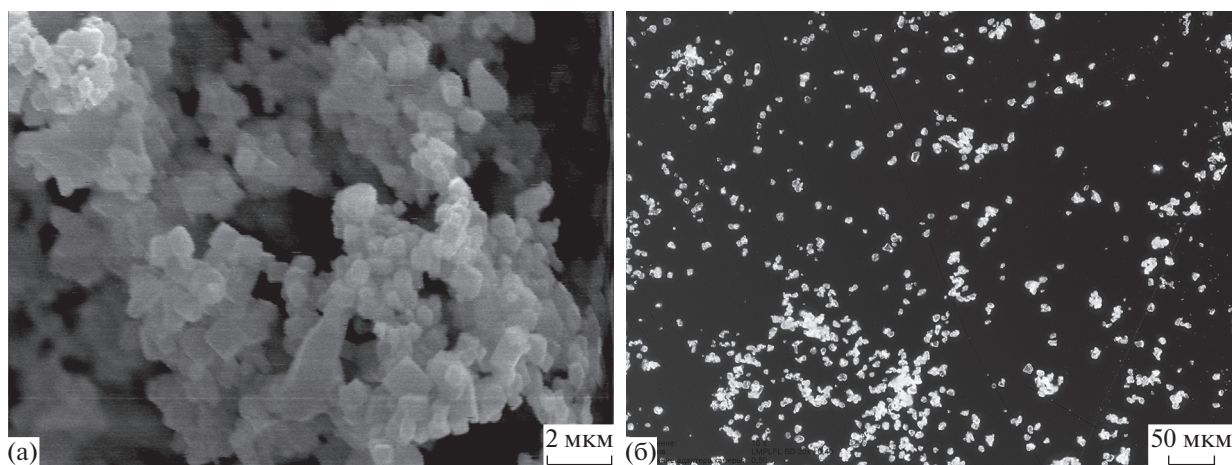


Рис. 2. Исходные порошки оксидов магния (а) и алюминия (б) (а – СЭМ; б – оптическая микроскопия, проходящий свет, поляризатор + анализатор).

подтверждается данными оптической и электронной микроскопии (рис. 2).

Для получения седиментационно устойчивых шликерных суспензий варьировали состав временной технологической связки (т.е. жидкой фазы суспензий). Исследования показали, что при использовании дистиллированной воды в качестве временной технологической связки происходит быстрая седиментация вводимых в состав шликеров порошков оксида магния и оксида алюминия. Это приводит к расслоению заготовки на стадии пропитки ППУ-каркасов шликером и, как следствие, возникновению деформаций и растрескиванию материала при обжиге. При замене воды на водные растворы оксихлорида алюминия и хлорида магния удалось получить керамические материалы, не имеющие деформаций и обладающие пористостью на уровне 80–85%, прочностью при сжатии в пределах 0.5–0.8 МПа. Данные компоненты на воздухе при воздействии температур выше 900°C необратимо переходят в соответствующие им оксиды: оксид алюминия и оксид магния, и, таким образом, не меняют фазовый состав керамических материалов. Поэтому при дальнейшем синтезе пенокерамики использовали только водные растворы оксихлорида алюминия и хлорида магния.

Исследования по влиянию температурно-временного режима обжига на свойства керамики проводили на трех сериях материалов с массовым соотношением компонентов $Al_2O_3 : MgO$, равным 10 : 90, 72 : 28 (шпинельное соотношение), 95 : 5. В результате проведенных исследований установлено, что в интервале от 1000 до 1400°C при продолжительности выдержки более 1 ч происходит образование следов алюмомагниевого шпинели. Интенсивное образование шпинели происходит при температурах обжига от 1500 до 1600°C с сохранением исходных оксидов алюминия и магния в структуре материалов. Практически полное

превращение исходных оксидов в шпинель происходит при температуре 1700°C.

При температурах обжига менее 1300°C наблюдается только припекание порошковых частиц друг к другу, в результате чего керамические материалы имеют низкую прочность. Интенсивное спекание частиц, сопровождающееся уменьшением микропор в межъячеистых перегородках и набором прочности материалов, происходит при температурах обжига выше 1600°C и продолжительности более 30 мин. Так, керамический материал, полученный в результате обжига при температуре 1700°C с выдержкой 1 ч, имеет плотные межъячеистые перегородки и ячеистые микропоры, повторяющие форму исходных ППУ-каркасов.

Физико-механические характеристики образцов, синтезированных в интервале 1600–1700°C (рис. 3), свидетельствуют, что их уровень пористости коррелирует с прочностными характеристиками независимо от химического состава: увеличение пористости приводит к уменьшению прочности. Максимальные значения прочности при сжатии 1.3–1.4 МПа показали материалы с наименьшим содержанием оксида алюминия – 10 мас. %. Для них характерны значения пористости на уровне 70 об. %. Минимальными значениями прочности – от 0.2 до 1.2 МПа – обладают материалы, имеющие шпинельное соотношение $MgO : Al_2O_3$. Соответственно, для них характерны наибольшие значения пористости – 75–86 об. %.

Установлено, что в интервале температур 1600–1700°C оксиды магния и алюминия необратимо и полностью реагируют друг с другом с образованием алюмомагниевого шпинели (рис. 4). Фазовый состав материалов определяется соотношением оксидов MgO и Al_2O_3 в исходном порошке. Оксид, взятый в недостатке, полностью реагирует с оксидом, взятым в избытке, с образованием шпинели и сохранением оксида, взятого в избытке. В керамических материалах, синтезированных из порошков, имеющих стехиометрическое шпинельное соотношение, происходит образование шпинели.

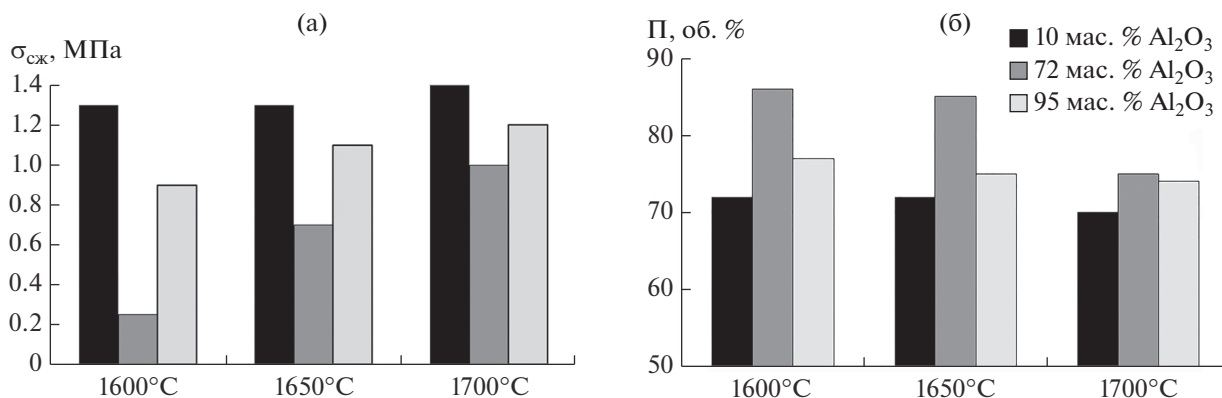


Рис. 3. Влияние температуры обжига на физико-механические характеристики материалов.

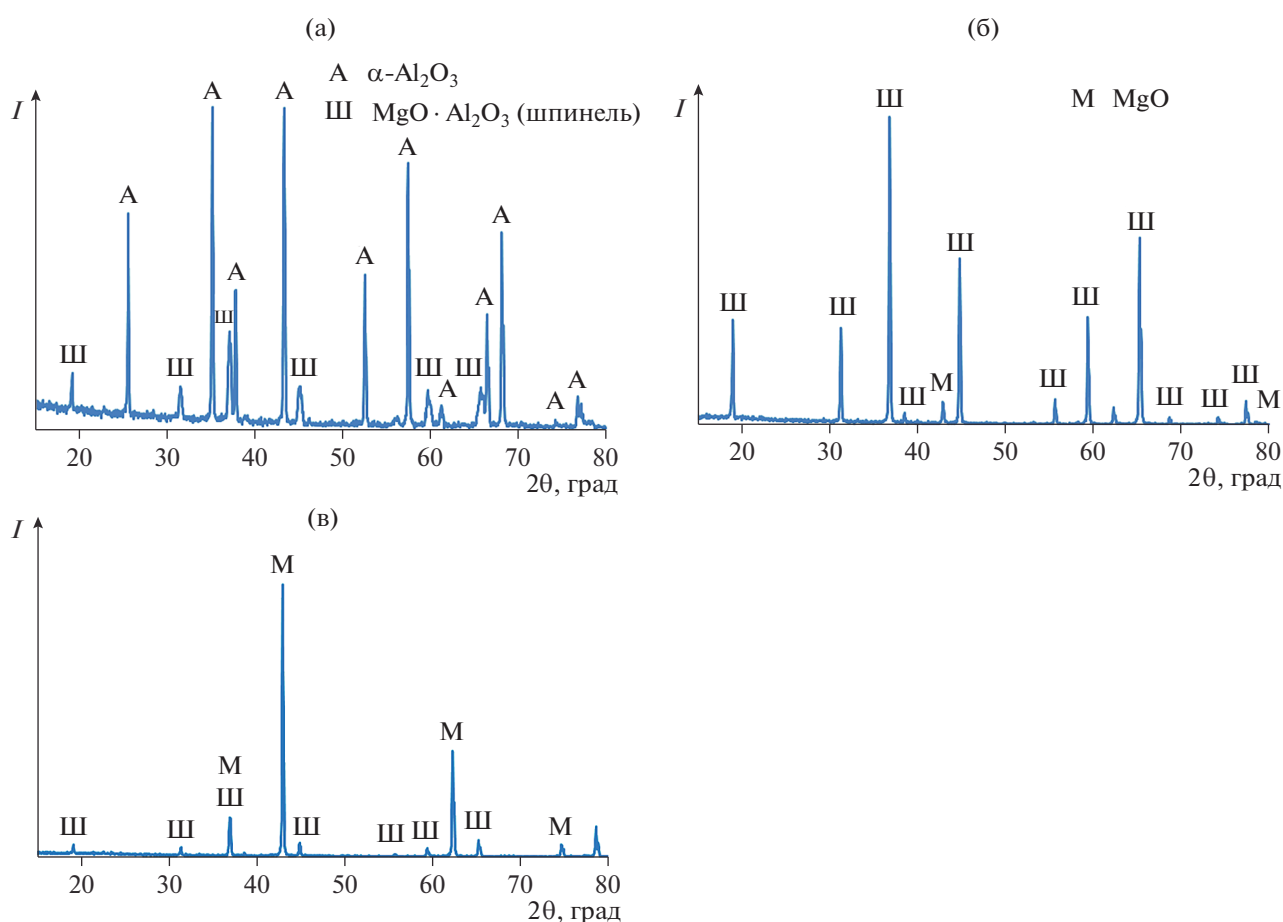


Рис. 4. Дифрактограммы керамических материалов (температура обжига 1700°C, продолжительность 2 ч): а – 95 мас. % Al_2O_3 , б – 72 мас. % Al_2O_3 (шпинельное соотношение $Al_2O_3 : MgO$), в – 10 мас. % Al_2O_3 .

тельное соотношение, присутствует только алюмомагниева шпинель (следы исходного оксида магния – результат незначительного отклонения от стехиометрии, связанного с погрешностью используемого оборудования).

Установлено, что материалы обладают открыто-ячеистой поровой структурой, повторяющей поро-

вую структуру исходных ППУ-губок (рис. 5). Размеры ячеистых макропор составляют 0.5–2 мм, что также соответствует размеру макропор в ППУ-губках. Межпоровые перегородки не содержат сквозных пустот, которые могут оставаться в материалах на месте выгорающего при обжиге ППУ, что свидетельствует о возможности получения керамических пеноматериалов по используемому в настоя-

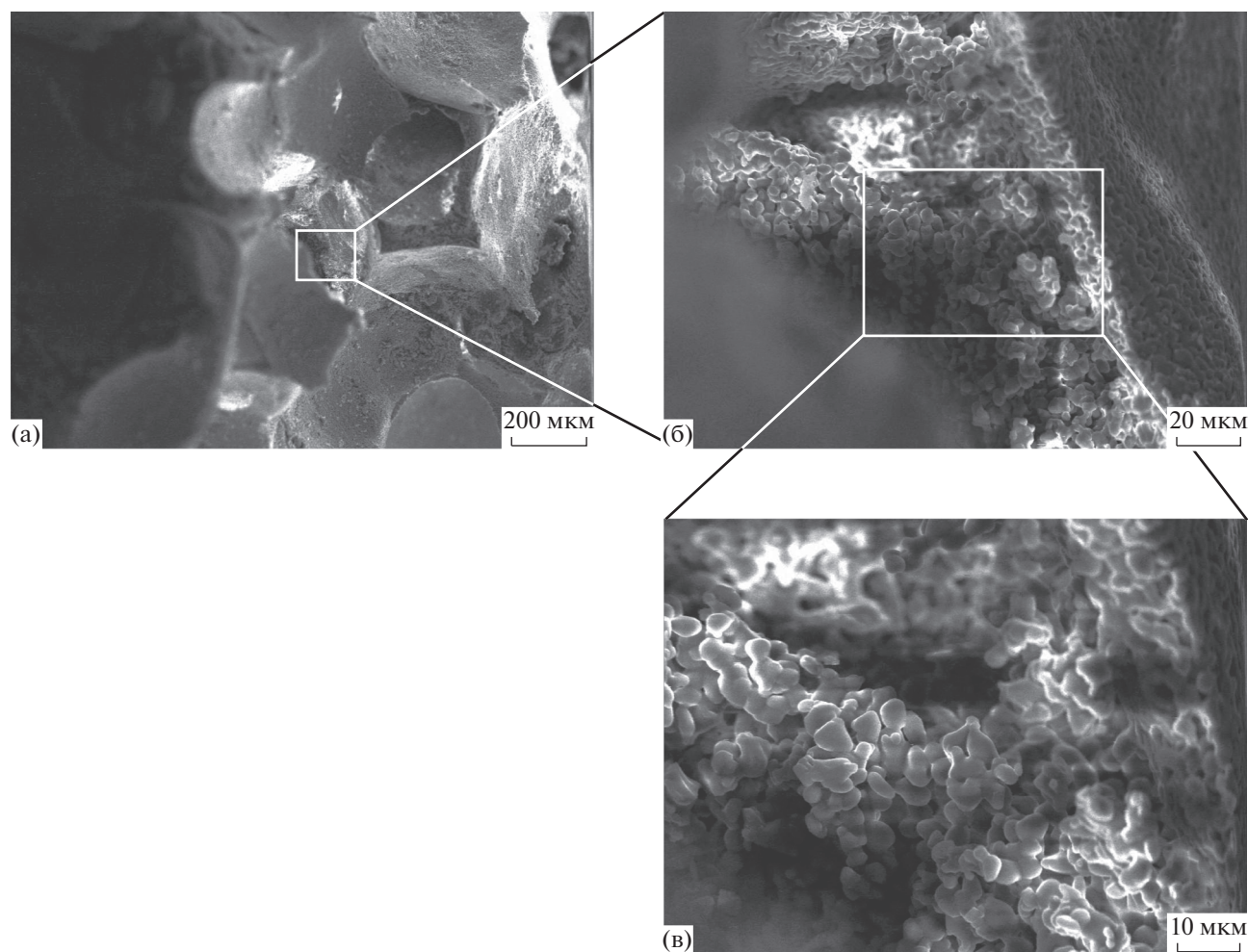


Рис. 5. СЭМ-изображения образцов пенокерамики (температура обжига 1700°C , продолжительность 1 ч): а–в – 95 мас. % Al_2O_3 , г–ж – 72 мас. % Al_2O_3 (шпинельное соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO}$), з–л – 10 мас. % Al_2O_3 .

шей работе методу. Перегородки всех образцов состоят из спекшихся зерен с размерами 1–10 мкм, при этом в перегородках присутствуют микропоры с размерами 1–20 мкм, обусловленные наличием пустот между спеченными частицами. Однако структура межпоровых перегородок для материалов, имеющих различное соотношение $\text{MgO} : \text{Al}_2\text{O}_3$, различается. Материалы, получаемые из смеси с избытком оксида алюминия и шпинельным соотношением оксида алюминия к оксиду магния, имеют спекшиеся частицы соответствующего состава с размерами 3–10 мкм. Материалы, получаемые из состава с избытком оксида магния, состоят из частиц шпинели с размерами порядка 3–10 мкм и окружающих их частиц оксида магния с размерами порядка 1 мкм, что соответствует размеру частиц исходного порошка оксида магния.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задачей данной работы являлось изучение возможности получения керамических материа-

лов системы $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, обладающих открытоячеистой поровой структурой с объемной долей сообщающихся пор 85–90% и прочностью при сжатии 0.5–1 МПа. При этом желательно, чтобы максимальные температуры термообработки сырых образцов не превышали $1600-1700^{\circ}\text{C}$. Для реализации заданных требований был разработан способ получения материалов путем спекания порошков оксида магния и оксида алюминия с различным соотношением $\text{MgO} : \text{Al}_2\text{O}_3$ с высокой степенью дисперсности для обеспечения ускоренного протекания процесса спекания по твердофазному механизму. Для синтеза керамики с заданной поровой структурой использовали метод пропитки шликером ППУ-каркасов, а для достижения седиментационной устойчивости шликеров и понижения температур спекания в состав материалов вводили спекающие добавки. В ряде работ [12–18] показана высокая эффективность использования добавок, ускоряющих процесс твердофазного спекания корундовой и диоксид-циркониевой керамики при достижении температур обжига порядка $1550-1600^{\circ}\text{C}$.

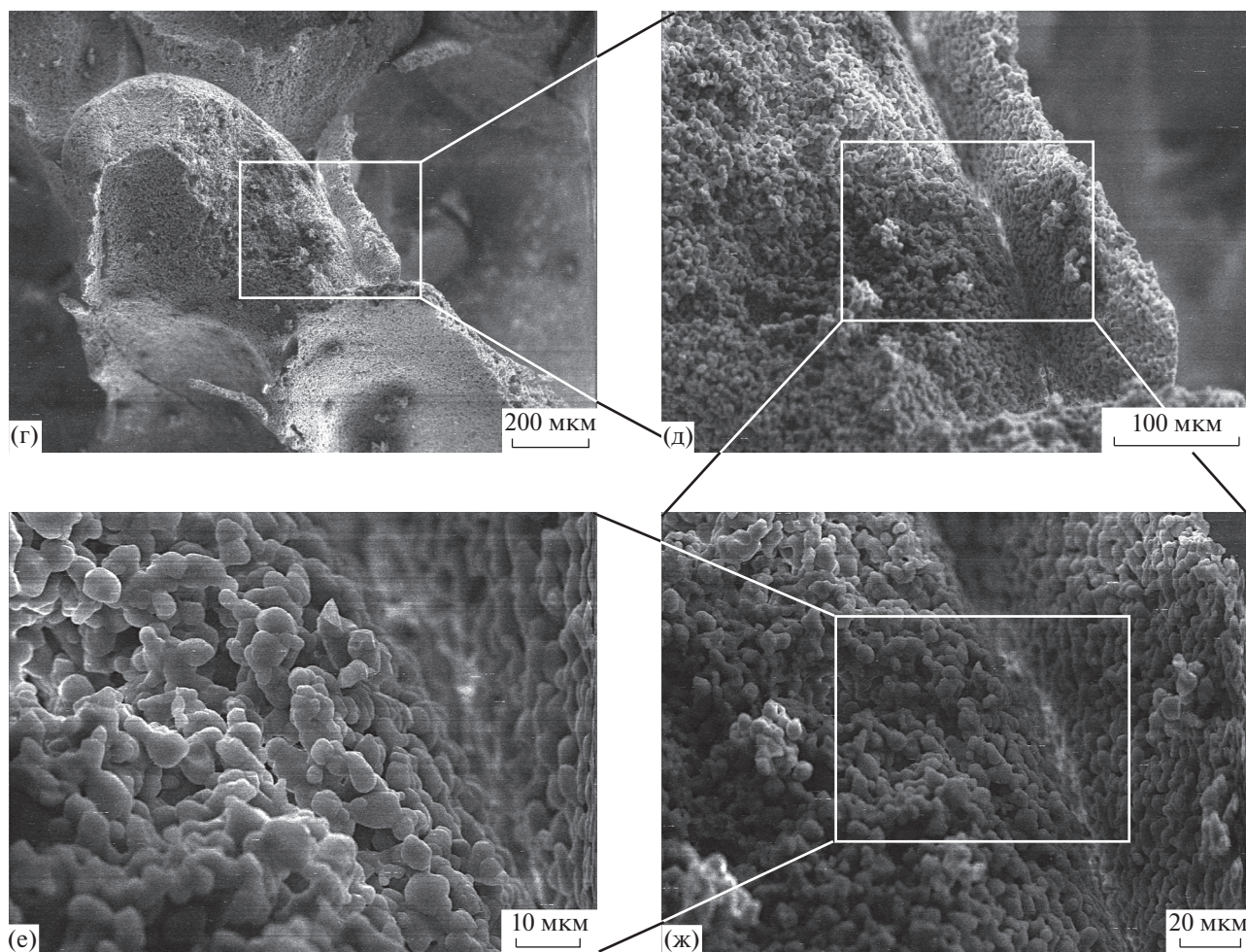


Рис. 5. Продолжение

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 [19–22]. Также использование хлорида магния и оксихлорида алюминия обеспечивает ускорение спекания за счет дополнительного образования оксидов алюминия, магния и шпинели на границах зерен спекаемых порошков за счет химических реакций между хлоридами и кислородом воздуха. Как следствие, в процессе спекания улучшается начальное прилипание частиц, в результате чего происходит набор прочности готового керамического изделия [19].

В случае отсутствия в шликерах спекающих добавок в процессе обжига в выбранном температурном диапазоне 1600–1700°C материалы не набирали прочность. Спекающие добавки при

воздействии температур превращаются в тонкодисперсные частицы оксида магния и оксида алюминия, имеющие большое количество дефектов в структуре. При отсутствии таких кристаллов, имеющих множество дефектов, в процессе обжига затруднена диффузия ионов между спекаемыми частицами. По данным [15, 16], в случае отсутствия 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 1600–1700°C и его продолжительности свыше 1 ч происходит образование шпинели за счет химического взаимодействия между частицами корунда и магнезии. Таким образом, межпоровые перегородки, образующие керамический каркас, представляют собой спекшиеся зерна исходного компонента, взятого в избытке, а также шпинели с размерами ча-

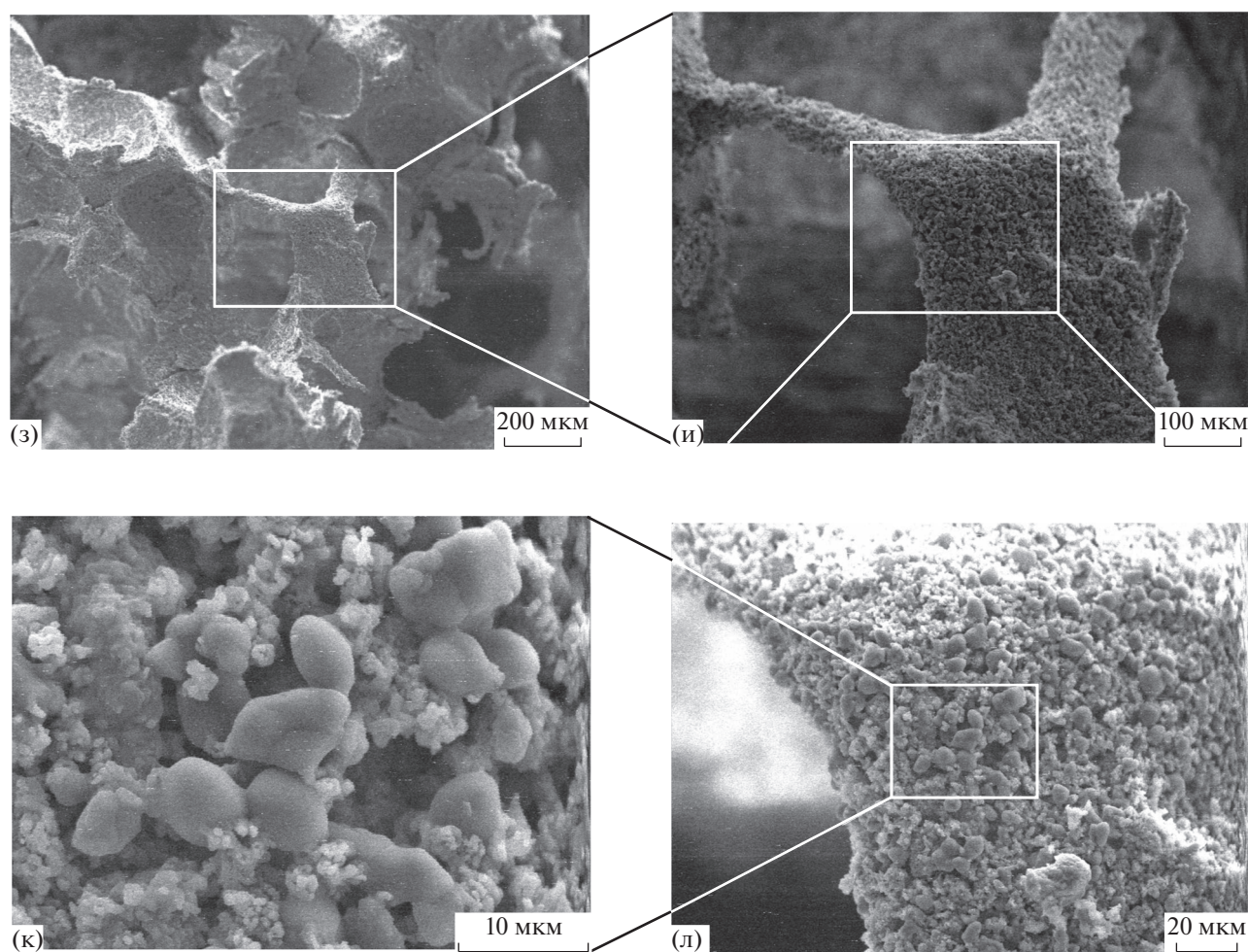


Рис. 5. Окончание

стиц 3–10 мкм, что соответствует размерам зерен исходного корунда в сырой заготовке. При термообработке материалов происходит взаимодействие между микронными зернами магнезии и крупными зернами корунда с образованием шпинели. 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, но и открытые микропоры.

Исследования показали, что оптимальными значениями прочности на уровне 0.7–1.4 МПа и общей пористости 85% обладают материалы, полученные при температурах обжига 1650–1700°C и продолжительности 2 ч. При этом наибольшей прочностью 1.1–1.4 МПа обладают материалы, имеющие избыточное содержание одного из оксидов (MgO либо Al₂O₃). Присутствие второго оксида в таких материалах выполняет роль спекающей добавки, которая способствует набору их проч-

ности. При использовании в составе исходной керамической массы шпинельного соотношения оксидов алюминия и магния в процессе обжига происходит образование алюмомagneзиевой шпинели и фактически отсутствует спекающая добавка иного фазового состава, способствующая набору прочности. Поэтому такие материалы обладают более низкой прочностью 0.7–1.0 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали возможность получения керамических пенофильтров на основе оксидов алюминия и магния, обладающих ячеистой поровой структурой с открытой пористостью до 85% и прочностью при сжатии до 0.7–1.4 МПа. Оптимальным режимом получения таких материалов является обжиг при 1650–1700°C в течение 2 ч при добавлении хлорида магния и оксихлорида алюминия в состав исходных шликеров. Возможность использования 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, что обеспечит в готовых пенофильтрах наличие развитой пористости в перегородках между макропорами за счет пустот между спеченными частицами, а также отсутствие в составе материала исходных компонентов.

Для достижения в материалах наибольших значений прочности и уменьшения температуры обжига требуется дальнейшая оптимизация состава керамической массы путем подбора спекающих добавок и варьирования фракционного состава спекаемых порошков, а также оптимизация состава шликерных суспензий путем подбора электролитов, позволяющих увеличить в шликере объемную долю твердой фазы с целью увеличения числа контактов между спекаемыми частицами при обжиге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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” // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. Т. 34. № 1. С. 3–33. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
2. *Каблов Е.Н.* На перекрестке науки, образования и промышленности // *Эксперт*. 2015. Т. 941. № 15. С. 49–53.
3. *Taslicukur Z., Balaban C., Kuskonmaz N.* Production of ceramic foam filters for molten metal filtration using expanded polystyrene // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007. № 27. P. 637–640.
4. Способ изготовления высокопористых ячеистых керамических изделий: Пат. РФ 2377224; № 2008114080/03 БИ. № 9. 2009. 6 с.
5. Способ получения керамических высокопористых блочно-ячеистых материалов: Пат. РФ 2580959; № 2015112820/03. // БИ. № 10. 2016. 8 с.
6. Manufacturing Method of a Ceramics Body Having Through Holes: Пат. 4664858 США; № 765340 1987. 5 с.
7. *Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А.* Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // *Тр. ВИАМ электрон. науч.-технич. журн.* 2013. № 2. Ст. 5. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.03.2019 г.).
8. *Бучилин Н.В., Прагер Е.П., Ивахненко Ю.А.* Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики шликеров для получения пористых керамических материалов на основе оксида алюминия // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. № 8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.03.2019). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-6-6>
9. *Сенина М.О., Лемешев Д.О., Колесников В.А.* Способы синтеза порошков алюмомагниевого шпинели для получения оптически прозрачной керамики (обзор) // *Стекло и керамика*. 2017. № 10. С. 19–25.
10. *Горшков В.А., Милосердов П.А., Юхвид В.И., Сачкова Н.В., Ковалев И.Д.* Получение магний-алюминиевой шпинели методами СВС-металлургии // *Неорган. материалы*. 2017. Т. 53. № 10. С. 1070–1075.
11. *Бучилин Н.В., Люлюкина Г.Ю., Варрик Н.М.* Влияние режима обжига на структуру и свойства высокопористых керамических материалов на основе муллита // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. № 5(53). Ст. 04. С. 32–41. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.03.2019). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-5-4-4>
12. *Крючков Ю.Н.* Определение среднего радиуса капилляров пористых материалов // *Стекло и керамика*. 2018. № 4. С. 16–21.
13. *Слюсарь О.А., Уваров В.М.* Влияние комплексных добавок на подвижность керамического шликера // *Стекло и керамика*. 2017. № 2. С. 44–46.
14. *Кичкайло О.В., Левицкий И.А.* Реологические характеристики шликеров при получении термостойкой литийалюмосиликатной керамики // *Стекло и керамика*. 2017. № 7. С. 37–44.
15. *Евтеев А.А.* Некоторые аспекты разработки оптимальных режимов обжига керамических композиций, содержащих эвтектические добавки // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. № 2(38). С. 101–106. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.03.2019). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-2-12-12>
16. *Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Орлова Л.А.* Исследование процесса спекания при получении стекло-керамики на основе стронцийалюмосиликатного стекла методом полусухого прессования // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. Т. 53. № 4. С. 55–62. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-4-55-62>
17. *Сафронова Т.В., Путляев В.И., Филиппов Я.Ю., Шталова Т.Б., Фатин Д.С.* Керамика на основе порошка брусита, синтезированного из нитрата кальция и гидрофосфатов натрия и калия // *Неорган. материалы*. 2018. Т. 54. № 2. С. 210–220.
18. *Савиных Д.О., Хайнаков С.А., Болдин М.С., Орлова А.И., Александров А.А., Ланцев Е.А., Сахаров Н.В., Мурашов А.А., Гарсия-Гранда С., Нохрин А.В., Чувильдиев В.Н.* Получение и тепловое расширение порошков и керамики $\text{Ca}_{0.75+0.5x}\text{Zr}_{1.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{PO}_4)_{3-x}(\text{SiO}_4)_x$ со структурой NZP // *Неорг. материалы*. 2018. Т. 54. № 12. С. 1338–1344.
19. *Химическая технология керамики: Уч. пособие для вузов / Под ред. Гузмана И.Я. М.: ООО РИФ Стройматериалы, 2003. 496 с.*
20. *Житнюк С.В.* Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.*, 2018. Т. 68. № 8. С. 81–88. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.03.2019). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
21. *Кашин Д.С., Дергачева П.Е., Стехов П.А.* Жаростойкие покрытия, наносимые шликерным методом (обзор) // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. Т. 65. № 5. С. 64–75. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 07.03.2019). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-5-64-75>
22. *Ковтунов А.И., Хохлов Ю.Ю., Мямин С.В.* Технология формирования и свойства композиционных пеноматериалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. Т. 36. № 3. С. 64–68. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-3-64-68>