

УДК 666.3.022.66

*Н.В. Бучилин¹, Е.П. Прагер¹, Ю.А. Ивахненко¹***ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК
НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИКЕРОВ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-0-6-6

Представлены результаты исследований реологических характеристик шликерных суспензий на основе оксида алюминия, предназначенных для изготовления керамических пеноматериалов. Показано, что замена в шликерах воды, используемой в качестве технологической связки, на водный раствор карбамида и оксихлорида алюминия приводит к уменьшению толщины двойного электрического слоя частиц корунда, что способствует улучшению формовости заготовок и увеличению механических характеристик керамических материалов. Определены диапазоны соотношений твердой (спекаемые порошки) и жидкой (технологическая связка) фаз, при которых в шликерах между частицами твердой фазы происходит образование коагуляционных и непосредственных контактов.

Ключевые слова: реология, шликер, шликерные суспензии, оксидная керамика, оксид алюминия, керамические фильтры.

In the present article the results of rheology characteristics investigations of alumina-based slurries for foam-ceramics production are presented. It is shown that replacement of water, that is used as technological ligament, by water solution of carbamide and aluminum oxychloride, leads to decrease of thickness of corundum particles electric double layer, that facilitates green bodies formability and improves mechanical characteristics of ceramic materials. The ratios of solid phase (sintering powders) to liquid phase (technological ligament) where either coagulation contacts or direct contacts between solid phase particles appears to form are determined.

Keywords: rheology, slurry, slip suspensions, oxide ceramics, alumina, ceramic filters.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 14.3. «Разработка сверхлегких пеноматериалов и волокнистых теплозащитных материалов (гибких, жестких, нетканых и текстильных), оптимизированных под конкретные задачи комплексной теплозащиты по критериям теплопроводности, термостойкости, химической стойкости, стойкости к скоростному напору, радиотехническим экономическим показателям, в том числе многообразных и абляционных» [1].

Высокопористые ячеистые керамические материалы (пенокерамические материалы) в настоящее время находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию арочной ячеистой поровой структуры, химической инертности, приемлемой прочности и технологичности изготовления [2–4]. В настоящее время такие материалы используются в качестве носителей катализаторов и фильтров для очистки газов в химической промышленности, биоинертных и биорезорбируемых костных имплантатов и эндопротезов, а также фильтров для очистки расплавов металлов от примесей, причем наибольшее распространение получила

керамика на основе оксида алюминия вследствие сочетания высокой химической стойкости и возможности эксплуатации при температурах до 1800–1900°C.

Получение пенокерамических материалов основано на пропитке шликерными суспензиями пенополиуретановых (ППУ) губок-каркасов с последующим обжигом при температурах порядка 1400–1800°C [5–8]. В производстве высокопористых ячеистых материалов критически важно равномерное распределение шликера в пенополиуретане. Шликерные суспензии должны обладать с одной стороны достаточно низкой вязкостью для хорошей пропитки ППУ-губок, и с другой – высоким содержанием твердой фазы (спекаемых порошков) для обеспечения образования прочных контактов между частицами в обожженном материале [9–12].

В проведенной ранее работе [13] было показано, что наиболее оптимальными для изготовления керамических изделий методом пропитки ППУ-губок являются суспензии с соотношением твердой и жидкой фаз, при котором образуются коагуляционно-тиксотропные структуры – т. е. происходит как сцепление частиц через прослойки жидкой фазы (коагуляционные контакты), так и их непосредственное соприкосновение с образованием каркаса из частиц порошка, находящегося в жидкой среде [14, 15]. Поскольку коагуляционно-тиксотропные структуры возникают в результате взаимного притяжения частиц твердой фазы под действием Ван-дер-Ваальсовых сил, пространственный каркас, образованный ими, способен к обратимому разрушению и восстановлению при приложении и снятии нагрузок соответственно, что способствует текучести шликерных суспензий при сохранении неразрывности дисперсной системы [15, 16].

В работе [13] установлено, что суспензии на основе порошков электрокорунда с размерами частиц 10–40 мкм, а также воды и водного раствора оксихлорида алюминия в области содержания жидкой фазы до 63% (объемн.) имеют непосредственные контакты между частицами твердой фазы, что приводит к резкому снижению текучести шликеров. При содержании жидкой фазы >69% (объемн.) образуются изолированные скопления частиц твердой фазы, что затрудняет образование между частицами прочных контактов при спекании. Оптимальными в качестве шликеров для пропитки ППУ-губок являются суспензии с концентрацией технологической связки 63–69% (объемн.), для которых характерно наличие коагуляционных контактов между частицами. Полученные из данных суспензий керамические материалы обладают открытой пористостью до 80% и прочностью при сжатии до 0,5 МПа.

На прочность материалов оказывает влияние не только уровень их ячеистой пористости, но и прочность межъячеистых перегородок, которая определяется прочностью контактов между частицами в обожженном материале. Поэтому прочность материала напрямую зависит от числа контактов между частицами в обожженном материале и, как следствие, доли частиц твердой фазы в шликере [17–19]. Повысить долю частиц твердой фазы при сохранении приемлемой текучести шликера можно путем использования пластифицирующих добавок, снижающих вязкость суспензий [20, 21]. Действие пластифицирующих добавок основано на уменьшении толщины двойного электрического слоя на поверхности частиц, под действием которого между ними формируются коагуляционные контакты, либо при высаливании из дисперсионной среды примесных веществ, увеличивающих вязкость дисперсной системы. Подбор пластифицирующих добавок для водных шликеров на основе корунда является актуальной задачей, так как поверхность частиц корунда химически инертна. Поэтому введение в состав таких шликеров основных или кислотных компонентов, а также добавок, рассчитанных на применение в шликерах на основе глин, не оказывает заметного влияния на толщину двойного электрического слоя корунда [15]. Одним из возможных путей повышения текучести шликеров является добавление в их состав поверхностно-активных веществ, улучшающих скольжение частиц корунда друг по другу.

Цель данной работы – оптимизация состава шликерных суспензий путем подбора электролитов, позволяющих увеличить объемную долю спекаемых порошков при сохранении приемлемых вязкостных характеристик.

Материалы и методы

Для приготовления шликеров использовали порошки электрокорунда марок М10, М20 и М40 (ГОСТ 3647–80) со средним размером частиц 10, 20 и 40 мкм соответственно. В качестве спекающей добавки в шликерные суспензии вводили помол стекла ХЛ №23 [20] с размером частиц 5–30 мкм. Для достижения в шликерах плотности упаковки частиц твердой фазы, близкой к максимальной, и реализации между частицами большого числа контактов, использовали следующее соотношение порошков, % (по массе): 65 – электрокорунд М40; 20 – электрокорунд М20; 10 – электрокорунд М10; 5 – стекло ХЛ №23.

В качестве технологических связок использовали: дистиллированную воду, водные растворы оксихлорида алюминия (ОХА), карбамида, стеарата натрия, хлорида и нитрата калия. Выбор в пользу оксихлорида алюминия сделан по причине того, что он может выступать в качестве спекающей добавки при обжиге, а также обладает клеящими свойствами, что способствуют упрочнению заготовок в процессе сушки и обжига. Стеарат натрия и карбамид способны к адсорбции на поверхностях твердых фаз, что может привести к уменьшению двойного электрического слоя частиц корунда и снижению трения между ними [21–23].

Определение эффективной вязкости шликерных суспензий при заданных скоростях деформации проводили на ротационном вискозиметре «Anton Paar» MCR-301. Расчет дифференциальной (пластической) вязкости осуществляли из экспериментальных кривых зависимости скорости деформации суспензий от напряжения сдвига (рис. 1) [15, 24].

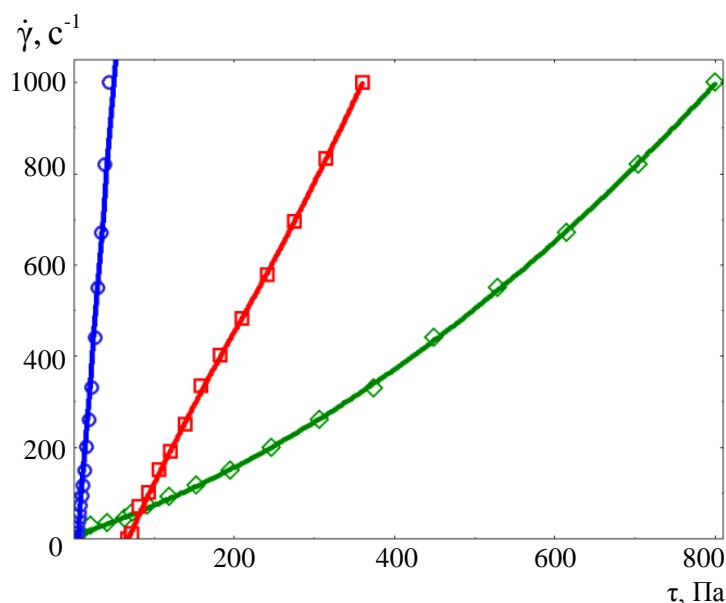


Рис. 1. Влияние напряжения сдвига (τ) на скорость деформации суспензий ($\dot{\gamma}$) при соотношении «порошок:технологическая связка» 34:66% (объемн.). Технологическая связка: \circ – вода; \square – водный раствор оксихлорида алюминия; \diamond – то же+карбамид

Для изготовления керамических пеноматериалов использовали ППУ-губки размером 30×30×15 мм с размером пор 0,2–1 мм. Заготовки получали пропитыванием ППУ-губок в избытке шликера. Обжиг заготовок осуществляли в электрической печи Nabertherm HT 16/18 при 1650°C в течение 1 ч. Прочность материалов при сжатии определяли на разрывной машине Instron 5965. Оптические исследования проводили на микроскопе Olympus BX51 с цифровой камерой Olympus DP73.

Результаты

По данным рентгенофазового анализа используемые порошки электрокорунда представляют фазу α -Al₂O₃ без заметных примесей (рис. 2, б). Исследования при помощи оптической микроскопии в проходящем поляризованном свете показали, что частицы порошков электрокорунда имеют форму, близкую к сферической, и являются монокристаллами (рис. 3, а–в). Стекло, используемое в качестве спекающей добавки, не содержит примесей кристаллических фаз, о чем свидетельствуют данные рентгенофазового анализа (рис. 2, а) и изотропия частиц в лучах проходящего поляризованного света (рис. 3, з).

На основании анализа реологических характеристик шликерных суспензий установлено, что образование дисперсных систем с коагуляционными контактами происходит в диапазоне содержания жидкой фазы в шликерах от 63 до 69% (объемн.) независимо от вида используемой в качестве технологической связки жидкости (рис. 4). Из полученных данных видно, что наименьшими значениями дифференциальной вязкости (т. е. наибольшей текучестью) обладают шликеры, затворенные в воде, и следовало ожидать, что данными шликерами ППУ-губки будут пропитываться легче всего. Однако в шликерах, затворенных на воде, частицы корунда склонны к седиментации, и при пропитке ППУ-губок такими шликерами во всем диапазоне соотношений воды к порошку происходит осаждение частиц корунда на поверхности губок с образованием фильтрующего слоя, препятствующего проникновению частиц корунда в объем губки и делающим невозможным получение материалов из данных шликерных суспензий.

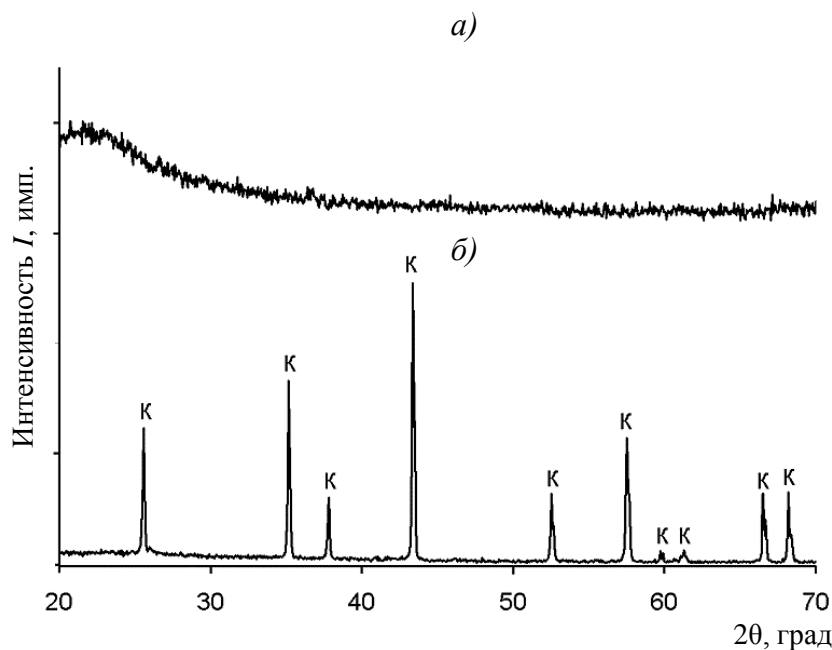


Рис. 2. Дифрактограммы порошков исходных компонентов (К – корунд):
 а – стекло ХЛ №23 (кристаллические фазы отсутствуют); б – электрокорунд М10 (кристаллическая фаза α -Al₂O₃)

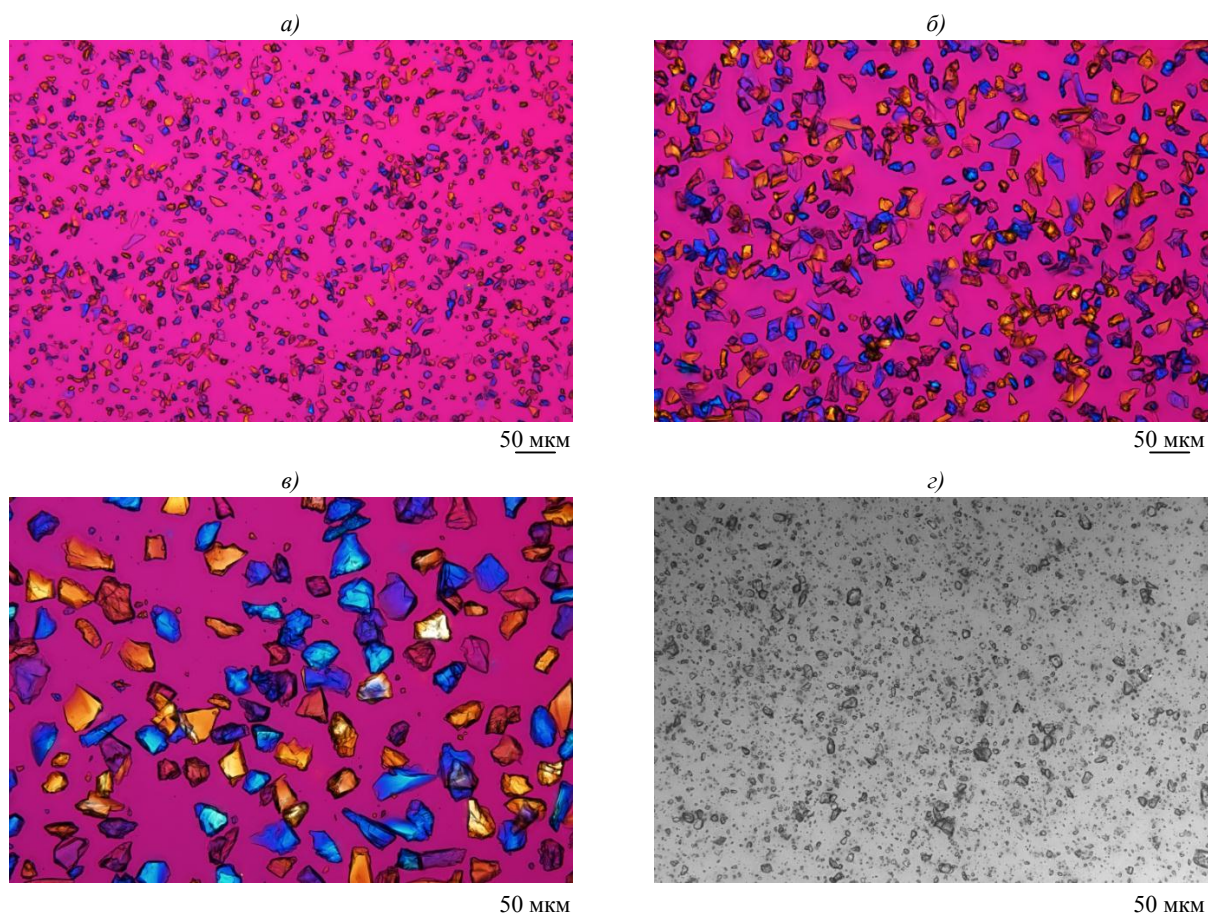


Рис. 3. Частицы порошков исходных компонентов (оптическая микроскопия, проходящий свет, поляризатор+анализатор): а – электрокорунд М10; б – электрокорунд М20; в – электрокорунд М40; г – стекло ХЛ №23

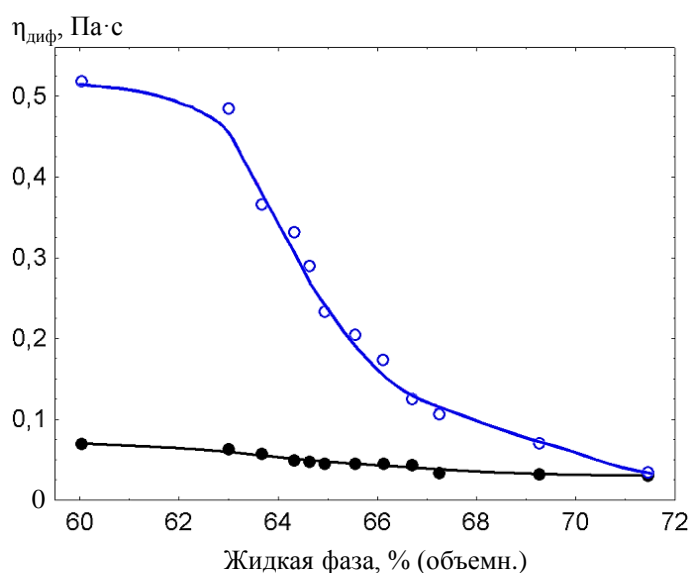


Рис. 4. Влияние объемной доли жидкой фазы в шликерных суспензиях на их дифференциальную вязкость. Технологическая связка: ○ – водный раствор ОХА; ● – вода

В шликерах, затворенных в 20% (по массе) водном растворе ОХА, частицы порошка корунда не склонны к седиментации, и такие шликеры пропитывают ППУ-губки с образованием заготовок с равномерно распределенной по всему объему массой. Обоженные керамические материалы, приготовленные с применением раствора оксихлорида алюминия, обладают прочностью при сжатии 0,5 МПа и пористостью на уровне 85% (объемн.).

Разбавление 20% (по массе) раствора ОХА водой с целью получения агрегативно устойчивых шликерных суспензий с высокой текучестью не привело к ожидаемым результатам – даже при умеренном разбавлении до концентрации 10% (по массе) ОХА частицы корунда в суспензиях склонны к седиментации. Добавление к раствору ОХА сильных электролитов (нитратов и хлоридов калия, натрия и аммония) также не привело к снижению их склонности к седиментации. Заметного улучшения технологических свойств удалось достичь при модификации раствора ОХА карбамидом и стеаратом натрия. Наиболее технологичными показали себя шликеры на следующих технологических связках: раствор состава 7% (по массе) оксихлорида алюминия+3% (по массе) карбамида; раствор состава 7% (по массе) оксихлорида алюминия+0,3% (по массе) стеарата натрия.

Исследования реологического поведения указанных шликерных суспензий в зависимости от концентрации технологической связки свидетельствуют о различиях в текучести данных дисперсных систем. Так, в выбранных диапазонах соотношений твердой и жидкой фаз системы на основе раствора оксихлорида алюминия ведут себя как неньютоновские бингамовские жидкости, для которых значения эффективной вязкости практически не зависят от доли твердой фазы в шликерах, а определяющим фактором является скорость деформации шликера, с увеличением которой происходит резкое снижение эффективной вязкости (рис. 5, а, рис. 6, а). Поведение дисперсных систем на основе раствора ОХА+карбамид ближе к идеальным ньютоновским жидкостям (рис. 5, б, рис. 6). Так, предел текучести для них в выбранных диапазонах соотношений твердой и жидкой фаз составляет 1–10 Па и увеличивается с увеличением содержания твердой фазы. Значения дифференциальной вязкости шликеров, модифицированных карбамидом и стеаратом натрия, составляют 0,5–1,2 и 0,2–1,0 Па·с соответственно, что значительно выше, чем для шликеров на основе чистого раствора ОХА. Однако в шликерах, приготовленных на модифицированных растворах ОХА, диапазон концентраций технологической связки для образования коагуляционно-тиксотропных структур ниже, чем у шликеров на растворе ОХА, и составляет:

Технологическая связка	Концентрация, % (объемн.)
ОХА+карбамид	59–67
ОХА+стеарат натрия	56–65
ОХА	63–69.

Суспензии, приготовленные на растворе ОХА+стеарат натрия, обладают пониженными по сравнению с суспензиями на основе раствора ОХА значениями предела текучести, не превышающими 50 Па. При этом поведение дисперсных систем на основе раствора ОХА+карбамид практически близко к ньютоновским жидкостям: значения предела текучести для них в выбранных диапазонах соотношений твердой и жидкой фаз – очень низкие и составляют 0,1–0,3 Па (рис. 6, а). Благодаря этому фактору последние шликеры являются наиболее технологичными при получении заготовок высокопористых ячеистых материалов.

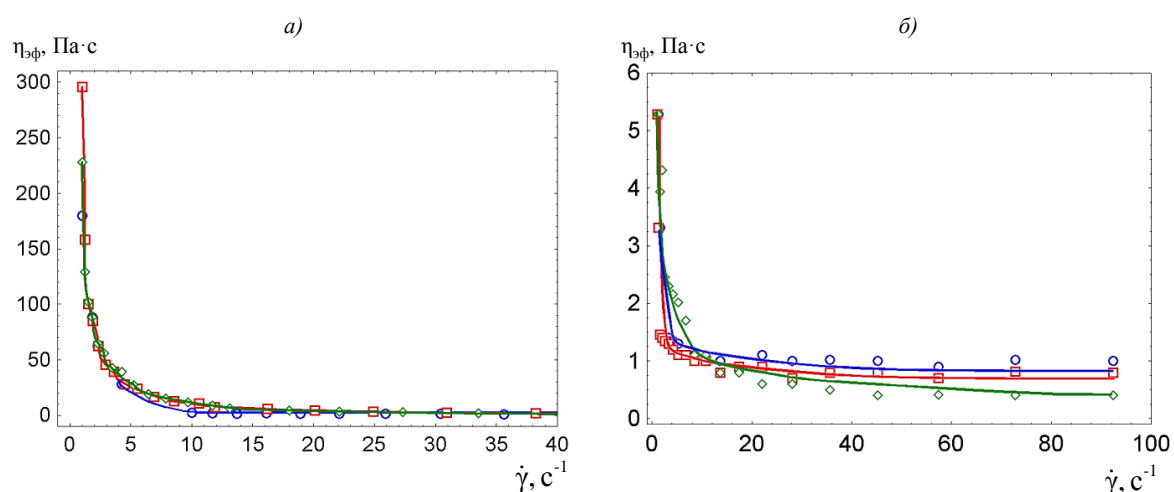


Рис. 5. Зависимость эффективной вязкости шликерных суспензий от скорости деформации: *a* – шликеры на водном растворе ОХА; *б* – шликеры на водном растворе ОХА+карбамид. Объемное содержание технологической связки в шликере, % (по массе): 60 – \diamond ; 65 – \square ; 69 – \circ

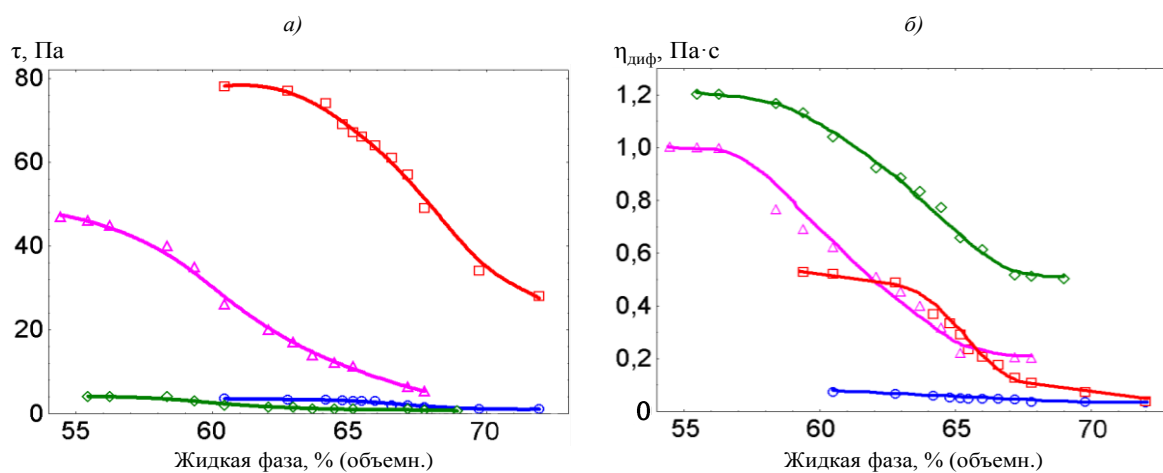


Рис. 6. Влияние объемной доли жидкой фазы в шликерных суспензиях на их реологические характеристики:

a – предел текучести; *б* – дифференциальная вязкость. Технологическая связка: \circ – вода; \square – водный раствор ОХА; \diamond – водный раствор ОХА+карбамид; \triangle – водный раствор ОХА+стеарат натрия

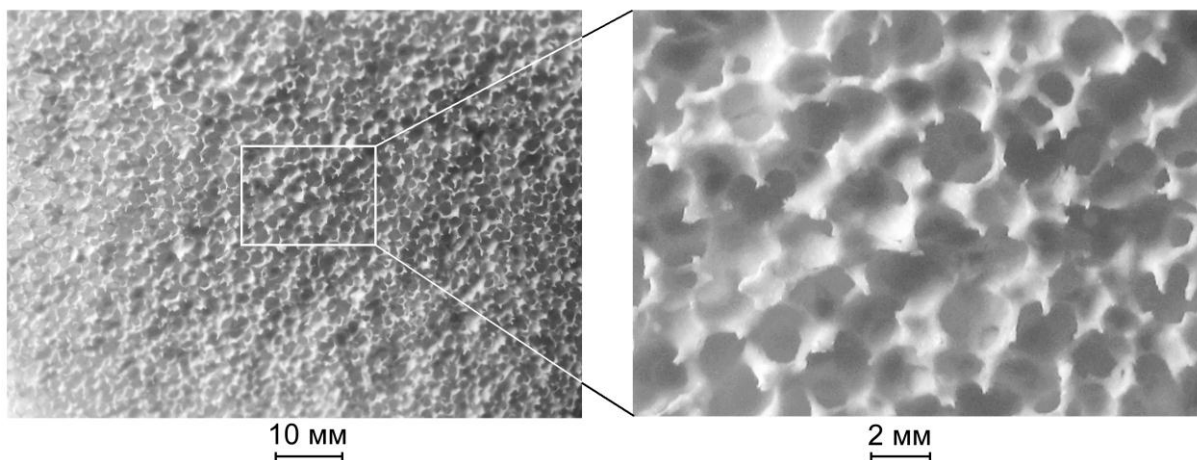


Рис. 7. Поровая структура керамических материалов (оптическая микроскопия, отраженный свет, темное поле)

Таким образом, с учетом полученных результатов изготовлены образцы ячеистых керамических материалов с диаметрами сообщающихся пор 0,2–1 мм (рис. 7) с применением шликерных суспензий на основе водного раствора ОХА+карбамид с объемным соотношением твердой и жидкой фаз 38:62, имеющих преимущественно коагуляционные контакты между частицами твердых фаз. Полученные образцы обладают пористостью 80–85% и прочностью при сжатии в пределах 1 МПа, что свидетельствует о возможности использования данных шликеров для получения ячеистых керамических материалов.

Обсуждение результатов

Характер кривых зависимости эффективной вязкости суспензий от скорости деформации (рис. 5) типичен для дисперсных систем, в которых между частицами твердой фазы возникают силы притяжения [16]. Спецификой таких систем является то, что при их образовании во всем объеме возникает трехмерный каркас из частиц дисперсной фазы, которые притягиваются друг к другу за счет Ван-дер-Ваальсовых сил, но имеют друг с другом коагуляционные контакты, которые возникают за счет образования двойного электрического слоя на поверхности частиц. При приложении к данным дисперсным системам критических сдвиговых напряжений, соответствующих скоростям 1–3 с⁻¹ для шликеров на основе воды и 5–20 с⁻¹ для шликеров на основе оксихлорида алюминия, происходит обратимое разрушение пространственного каркаса из частиц оксида алюминия, что приводит к резкому снижению эффективной вязкости систем – с 300 до 0,5 Па·с. При прекращении воздействия нагрузок структура восстанавливается, что является благоприятным условием для удержания шликерных суспензий на пропитываемых ими пенополиуретановых каркасах.

Кривые зависимости дифференциальной (пластической) вязкости от содержания объемной доли жидкой фазы для шликеров, приготовленных на растворе оксихлорида алюминия, указывают на наличие трех концентрационных зон с различным характером контактов между частицами оксида алюминия (рис. 4). Первая зона – концентрация жидкой фазы до 63% (объемн.), в которой частицы твердой фазы имеют непосредственные контакты, и шликеры представляют собой густые пастообразные структуры. Уменьшение содержания жидкой фазы в пределах этой зоны не приводит к заметному снижению дифференциальной вязкости дисперсных систем, что связано с плотным прилеганием частиц друг к другу и, как следствие, преобладающими силами трения между частицами.

Вторая зона – концентрационный диапазон жидкой фазы 63–69% (объемн.), в которой частицы имеют как непосредственные, так и коагуляционные контакты, шликеры этой зоны – вязкотекучие. В пределах этой зоны увеличение содержания жидкой фазы приводит к значительному снижению дифференциальной вязкости дисперсных систем, что связано с уменьшением числа непосредственных контактов между частицами и увеличением числа коагуляционных контактов, образующихся через прослойки жидкой фазы.

Третья зона – концентрация жидкой фазы >69% (объемн.), в которой агломераты твердых частиц изолированы друг от друга. Шликеры представляют собой текучие жидкости, твердые частицы в них склонны к седиментации при хранении. При этом седиментация частиц ожидаемо быстрее происходит в шликерах на основе воды, так как она обладает меньшей плотностью и меньшей вязкостью, чем раствор оксихлорида алюминия.

Суммируя полученные данные по реологии шликерных суспензий с добавками карбамида и стеарата натрия можно заключить, что введение в технологическую связку карбамида приводит к уменьшению толщины двойного электрического слоя твердых

частиц. При этом уменьшается трение между частицами корунда, приводящее к уменьшению предельных сдвиговых усилий, необходимых для возникновения течения дисперсной системы [15, 24]. В результате не происходит образования прочного каркаса из частиц твердой фазы, поэтому реологическое поведение дисперсных систем, содержащих карбамид, приближается к ньютоновским жидкостям. Уменьшение толщины двойного электрического слоя также приводит к тому, что для образования коагуляционно-тиксотропных структур в дисперсных системах требуется большее количество частиц твердых фаз, что в свою очередь способствует снижению диапазона содержания технологической связки для образования коагуляционно-тиксотропных структур. Это приводит также к увеличению дифференциальной вязкости системы по причине возникновения большего числа контактов между частицами.

Заключение

Задачей данной работы являлось получение шликерных суспензий с высокой долей порошка электрокорунда, при этом легко пропитывающих ППУ-каркасы с размером сообщающихся пор 0,2–1 мм. Проведенные исследования показали, что данным требованиям удовлетворяют шликеры, приготовленные на водном растворе ОХА+карбамид. Такие суспензии в области содержания жидкой фазы до 59% (объемн.) имеют непосредственные контакты между твердыми частицами; при >67% (объемн.) появляются изолированные скопления частиц; в пределах содержания жидкой фазы 59–67% (объемн.) возникают преимущественно коагуляционные контакты. Последние суспензии являются наиболее оптимальными при использовании в качестве шликеров, так как они равномерно пропитывают ППУ-губки и удерживаются на внутриспоровой поверхности губок. Однако такие суспензии обладают наибольшей дифференциальной вязкостью из всех исследованных суспензий 0,5–1,2 Па·с (см. рис. 6, б) и близки по реологическому поведению к ньютоновским жидкостям – предел текучести для них составляет 1–5 Па (см. рис. 6, а). Шликеры, приготовленные на воде и растворе оксихлорида алюминия, либо растворе оксихлорида алюминия с добавкой стеарата натрия, хотя и обладают меньшими значениями дифференциальной вязкости, однако неравномерно пропитывают ППУ-губки с выделением порошка корунда в виде корки на поверхности губок.

Керамические материалы, полученные пропиткой каркасов оптимальными суспензиями, обладают открытой пористостью до 85% и прочностью при сжатии 1 МПа. Для достижения наибольших значений прочности требуется дальнейшая оптимизация состава шликеров путем подбора пластификаторов, позволяющих увеличить в суспензиях объемную долю спекаемых порошков при сохранении приемлемых реологических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

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. №1 (34). С. 3–33.
2. Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Беспалов А.В., Попова Н.А. и др. Применение керамических высокопористых блочно-ячеистых палладиевых катализаторов в процессе окисления изотопов водорода // Стекло и керамика. 2014. №11. С. 22–25.
3. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // МиТОМ. 1999. №1. С. 32–34.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
5. Керамический фильтр, содержащий углеродное покрытие, и способ его изготовления: пат. 2456056 Рос. Федерация; заявл. 28.01.08; опубл. 20.07.12 Бюл. №20. 15 с.

6. Yang W., Jiang B., Wang A., Shi H. Effect of Negatively Charged Ions on the Formation of Micro-arc Oxidation Coating on 2024 Aluminium Alloy // *Journal of Material Science and Technology*. 2012. №28 (8). P. 707–712.
7. Vogt U.F., Gorbar M., Dimopoulos-Eggenschwiler P., Broenstrup A., Wagner G., Colombod P. Improving the properties of ceramic foams by a vacuum infiltration process // *Journal of the European Ceramic Society*. 2010. №30. P. 3005–3011.
8. Анциферов В.Н. Проблемы порошкового материаловедения. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. Ч. II. 263 с.
9. Химическая технология керамики: учеб. пособ. для вузов / под ред. И.Я. Гузмана. М.: Стройматериалы, 2003. 496 с.
10. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // *Наука и жизнь*. 2012. №11. С. 16–21.
11. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.04.2016).
12. Маркова С.В., Турлова О.В., Пономаренко А.А. Применение ПАВ в производстве силикатных материалов // *Стекло и керамика*. 2013. №3. С. 20–22.
13. Бучилин Н.В., Прагер Е.П. Реологические характеристики шликерных суспензий на основе оксида алюминия // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.04.2016).
14. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 2004. 445 с.
15. Практикум и задачник по коллоидной химии / под ред. В.В. Назарова, А.С. Гродского. М.: Академкнига. 2007. 374 с.
16. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб: Профессия, 2007. 560 с.
17. Кириенко Т.А., Балинова Ю.А. Влияние атмосферной влажности на реологию тонких слоев концентрированных водных растворов системы «неорганические соли–органический полимер» // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 56–58.
18. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон α -Al₂O₃ // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 13–17.
19. Кириенко Т.А., Балинова Ю.А. Физико-химические свойства многокомпонентных растворов для керамических материалов, содержащих поливиниловый спирт // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 34–38.
20. Технология стекла. 3-е изд. / под ред. И.И. Китайгородского. М.: Гос. изд-во лит-ры по стр-ву, архит. и стр-ным матер. 1961. 624 с.
21. Пикалов Е.С., Сысоев Э.П., Сиднева Ю.В. Реологические свойства шликеров на основе глин Мстерского месторождения // *Стекло и керамика*. 2014. №6. С. 28–33.
22. Уварова Н.Е., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Орлова Л.А., Саркисов П.Д. Высокотемпературные радиопрозрачные материалы: сегодня и завтра // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №1. С. 16–21.
23. Балинова Ю.А., Щеглова Т.М., Люлюкина Г.Ю., Тимошин А.С. Особенности формирования α -Al₂O₃ в поликристаллических волокнах с содержанием оксида алюминия 99% в присутствии добавок Fe₂O₃, MgO, SiO₂ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №3. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.04.2016).
24. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.