



УДК 666.37

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-6-6

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИКЕРНЫХ
СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Н.В. Бучилин

кандидат технических наук

Е.П. Прагер

Май 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 666.37

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-6-6

Н.В. Бучилин¹, Е.П. Прагер¹

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИКЕРНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Представлены результаты исследований реологических характеристик шликерных суспензий на основе оксида алюминия. Показано, что в суспензиях между частицами твердой фазы возникают силы взаимного притяжения, приводящие к образованию контактов между ними. 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.

N.V. Buchilin, E.P. Prager

RHEOLOGY OF ALUMINA-BASED SLURRY SUSPENSIONS

The results of rheological investigations of alumina-based slurries are presented in the present article. It was considered that the mutually attractive forces appear between solid phase particles in suspensions providing formation of interconnections between the particles. The ranges for ratios between solid phase (sintered powders) and liquid phase (technological binding agent) were determined experimentally for slurries, when coagulation contacts and direct contacts between solid phase particles appear in the slurries.

Keywords: rheology, slurry, slurry 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

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, использующихся для облицовки камеры или резервуара, в которых образуется расплав металла. Удаление таких включений фильтрацией позволяет создавать однородный расплав и, таким образом, повышает качество выпускаемой продукции, в особенности при выпуске стали, чугуна и алюминия [1–3]. Керамические ячеистые пеноматериалы на основе оксида алюминия находят применение в качестве носителей катализаторов и керамических фильтров для расплавов металлов. Получение таких материалов основано на пропитке шликером пенополиуретановых (ППУ) каркасов с последующим их обжигом при температурах ~1400–1700°C [4–8].

В процессе производства пенокерамики очень большое значение имеет равномерное распределение шликера в ППУ каркасе. Шликерные суспензии должны обладать, с одной стороны, достаточной вязкостью для хорошей пропитки ППУ каркасов, а с другой – высоким содержанием твердой фазы (спекаемых порошков) для обеспечения образования прочного контакта между частицами в обожженном материале [9–12]. При высоких концентрациях порошков в шликерных суспензиях частицы имеют большое число контактов между собой, что препятствует текучести и приводит к образованию разрывов и трещин при формовании заготовок методами шликерного литья и пропитки [13, 14]. При малых концентрациях твердых частиц не происходит их сцепления и, как следствие, набора прочности в готовых изделиях. Наиболее оптимальными для изготовления керамических изделий методом пропитки каркасов и шликерного литья являются суспензии с объемной долей спекаемых порошков, при которой образуются коагуляционные структуры – т. е. происходит как сцепление частиц через прослойки жидкости, так и их непосредственное соприкосновение с образованием каркаса [9, 15, 16]. Поскольку коагуляционные структуры возникают в результате Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий частиц, пространственный каркас в них обратимо разрушается при приложении нагрузок, что способствует текучести шликерных суспензий при сохранении неразрывности дисперсной системы.

Известно, что дифференциальная (пластическая) вязкость шликерных суспензий уменьшается с увеличением доли жидкой фазы. При этом в зоне концентрации жидкой фазы, соответствующей образованию между частицами непосредственных контактов, а также зоне концентрации, соответствующей изолированным частицам, такое влияние незначительно. Наибольшее изменение вязкости при изменении соотношения твердой и жидкой фаз наблюдается в зоне концентрации, соответствующей формированию коагуляционных контактов между частицами твердой фазы [16–18], что является косвенным методом определения концентрационных пределов возникновения в системах коагуляционных контактов [19–22]. Данная работа посвящена изучению реологических характеристик шликерных суспензий на основе оксида алюминия с различным соотношением твердой и жидкой фаз и установления концентрационных пределов возникновения в системах коагуляционных контактов с целью определения оптимальных составов шликеров для получения керамических пенофильтров.

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 (рис. 1, а–в). По данным рентгенофазового анализа порошки представляют собой корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) без заметных примесей (рис. 2). В качестве спекающей добавки в шликерные суспензии вводили помол стекла марки ХЛ №23 [23] с размером частиц 5–30 мкм (рис. 1, г).

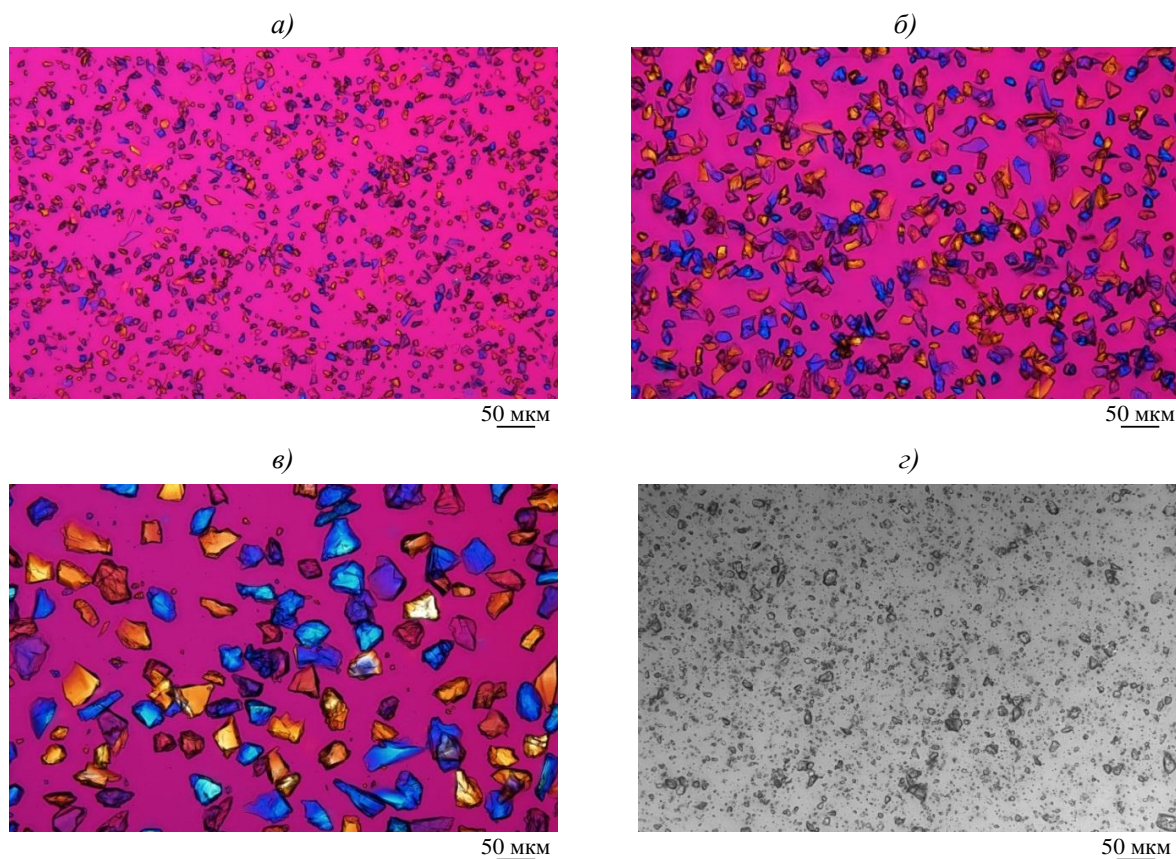


Рис. 1. Вид частиц порошков исходных компонентов (оптическая микроскопия, проходящий свет, поляризатор+анализатор) электрокорунда марок М10 (а), М20 (б), М40 (в) и стекла марки ХЛ №23 (г)

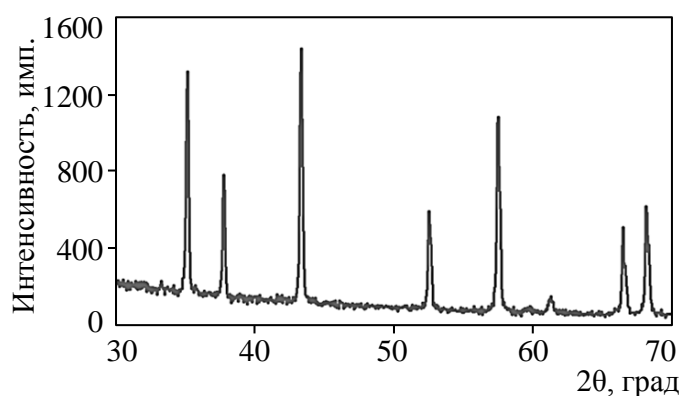


Рис. 2. Дифрактограмма порошка электрокорунда М10 (кристаллическая фаза – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)

Для достижения в шликерах плотности упаковки частиц твердой фазы, близкой к максимальной, и реализации между частицами большого числа контактов, использо-

вали следующее соотношение порошков, % (по массе): 65 электрокорунда М40; 20 электрокорунда М20; 10 электрокорунда М10 и 5 стекла ХЛ №23. В качестве технологических связок использовали дистиллированную воду и 16%-ный водный раствор оксихлорида алюминия (ОХА) с плотностью 1250 кг/м^3 .

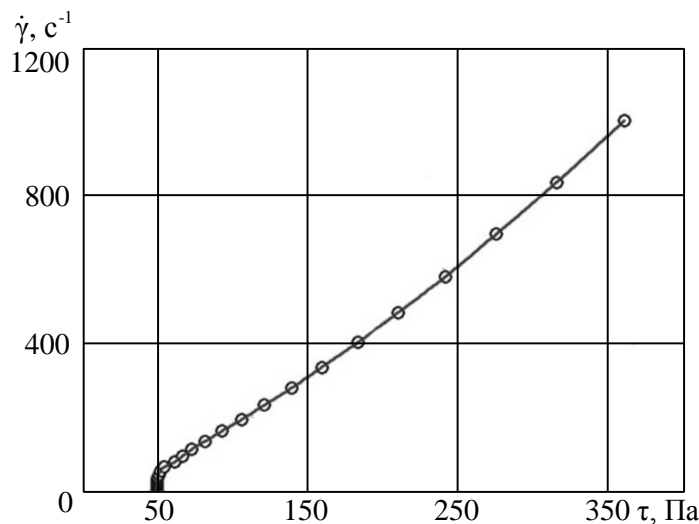


Рис. 3. Влияние напряжения сдвига (τ) на скорость деформации суспензии ($\dot{\gamma}$) при соотношении «порошок–раствор оксихлорида алюминия» 37:63% (объемн.)

Исследование эффективной вязкости шликерных суспензий при заданных скоростях деформации проводили на ротационном вискозиметре «Anton Paar» MCR-501. Определение дифференциальной вязкости осуществляли по экспериментальным кривым зависимости скорости деформации суспензий от напряжения сдвига [15, 16]. Вид представленной кривой типичен для вязкопластических дисперсных систем (рис. 3).

Результаты

Проведенные исследования реологии шликерных суспензий с различным соотношением твердой и жидкой фаз (рис. 4, а, б) свидетельствуют, что в выбранных диапазонах соотношений 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. При этом в шликерных суспензиях с наименьшей долей жидкой фазы (до 64% объемн.) при низких скоростях деформации с помощью прибора фиксируются колебания значений вязкости, свидетельствующие об образовании разрывов в потоке суспензий (рис. 4, в).

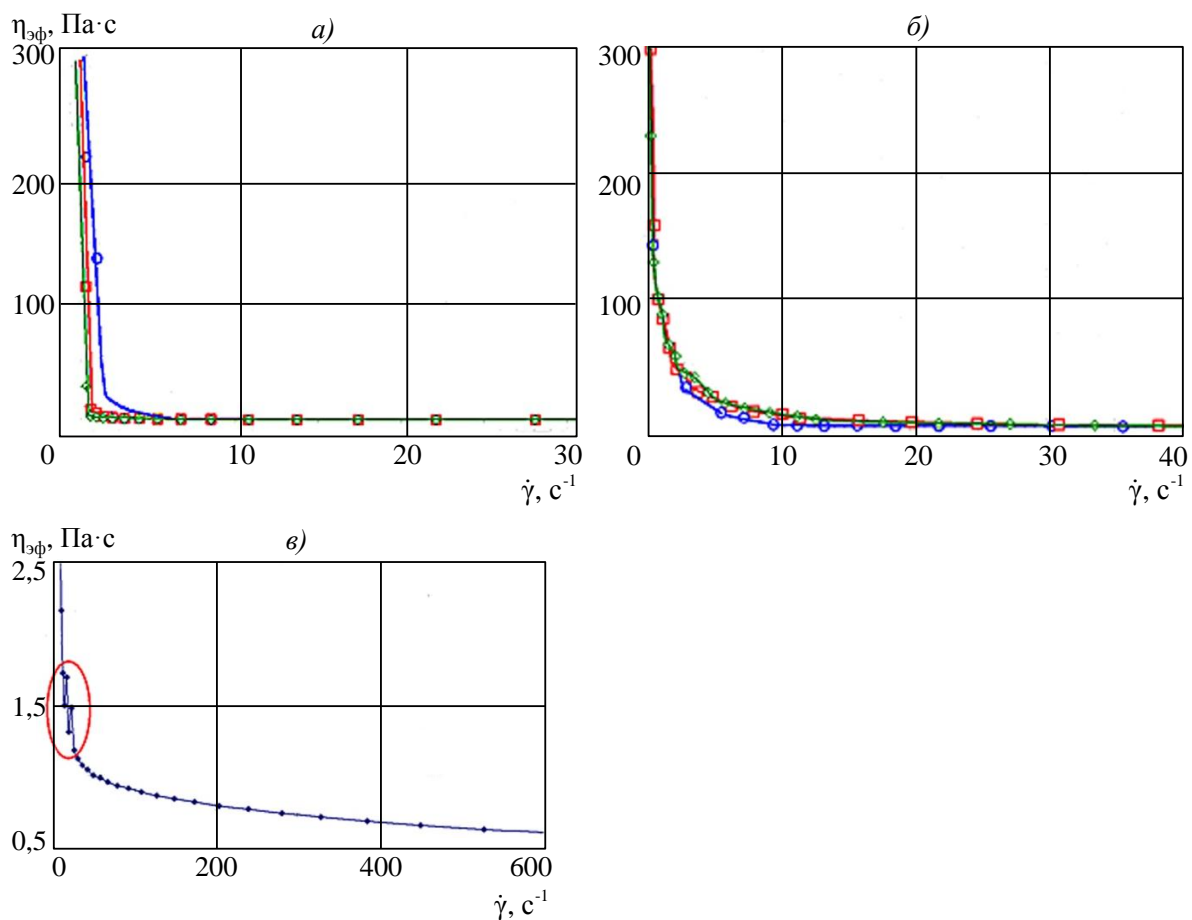


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости шликерных суспензий ($\eta_{эф}$) от скорости деформации ($\dot{\gamma}$) при концентрациях 60 (○), 65 (◐) и 69% (объемн.) (○) в шликерах на воде (а) и растворе оксихлорида алюминия – ОХА (б); в – шликер на растворе «ОХА–порошок» при концентрации 40:60% (объемн.)

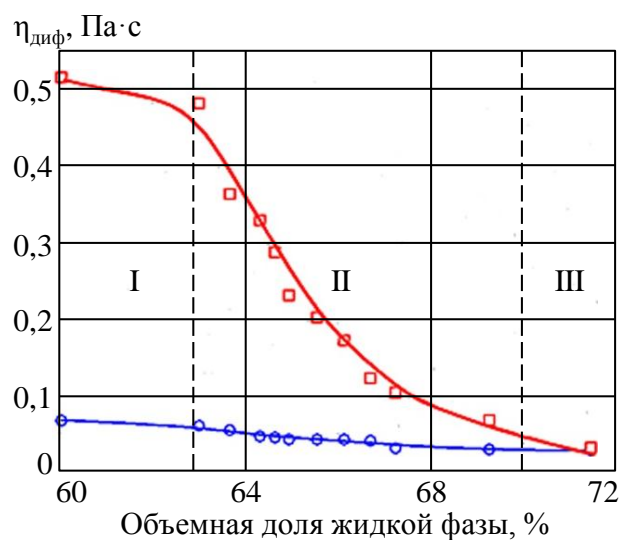


Рис. 5. Влияние объемной доли жидкой фазы (I–III – концентрационные зоны) на дифференциальную вязкость шликерных суспензий на основе воды (○) и раствора оксихлорида алюминия (◻)

Дифференциальная вязкость шликерных суспензий закономерно уменьшается с увеличением в них доли жидкой фазы (рис. 5). При этом значения дифференциальной вязкости шликеров на оксихлориде алюминия выше, чем шликеров на воде: 0,06–0,5 и 0,02–0,8 Па·с соответственно.

Обсуждение и заключения

Характер кривых зависимости эффективной вязкости суспензий от скорости деформации 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 находятся в контакте друг с другом и связаны Ван-дер-Ваальсовыми силами. При приложении к дисперсным системам критических напряжений, соответствующих угловым скоростям $1\text{--}3\text{ с}^{-1}$ для шликеров на основе воды и $5\text{--}20\text{ с}^{-1}$ 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 ППУ каркасах.

Кривые зависимости дифференциальной вязкости шликеров от содержания в них объемной фазы указывают на наличие трех концентрационных зон с различным характером контактов между частицами оксида алюминия (см. рис. 5). *Первая зона (I)* – концентрация жидкой фазы до 63% (объемн.). Это зона, 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. Большая доля частиц твердой фазы в этой области также является причиной возникновения разрывов между слоями дисперсных систем при приложении нагрузок, о чем свидетельствуют колебания на кривых зависимости эффективной вязкости от скоростей деформации (см. рис. 4, в).

Вторая зона (II) – концентрационный диапазон жидкой фазы 63–70% (объемн.). 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 (III) – концентрация жидкой фазы $>70\%$ (объемн.). Это зона, в которой агломераты твердых частиц изолированы друг от друга. Шликеры представляют собой текучие жидкости, твердые частицы в них склонны к оседанию при хранении. При этом оседание частиц ожидаемо быстрее происходит в шликерах на основе воды, так как она обладает меньшей плотностью и меньшей вязкостью, чем раствор оксихлорида алюминия.

На основании изложенных данных из шликерных суспензий на основе раствора оксихлорида алюминия, имеющих преимущественно коагуляционные контакты между частицами твердой фазы (зона II – см. рис. 5), были получены образцы ячеистых керамических материалов методом пропитки пенополиуретановых губок со средним диаметром отверстий 1 мм с последующим обжигом заготовок при температуре 1650°C (рис. 6). Образцы обладают пористостью на уровне 75–85% и прочностью при сжатии в пределах 0,5 МПа, что свидетельствует о возможности использования шликерных суспензий для получения ячеистых керамических материалов.

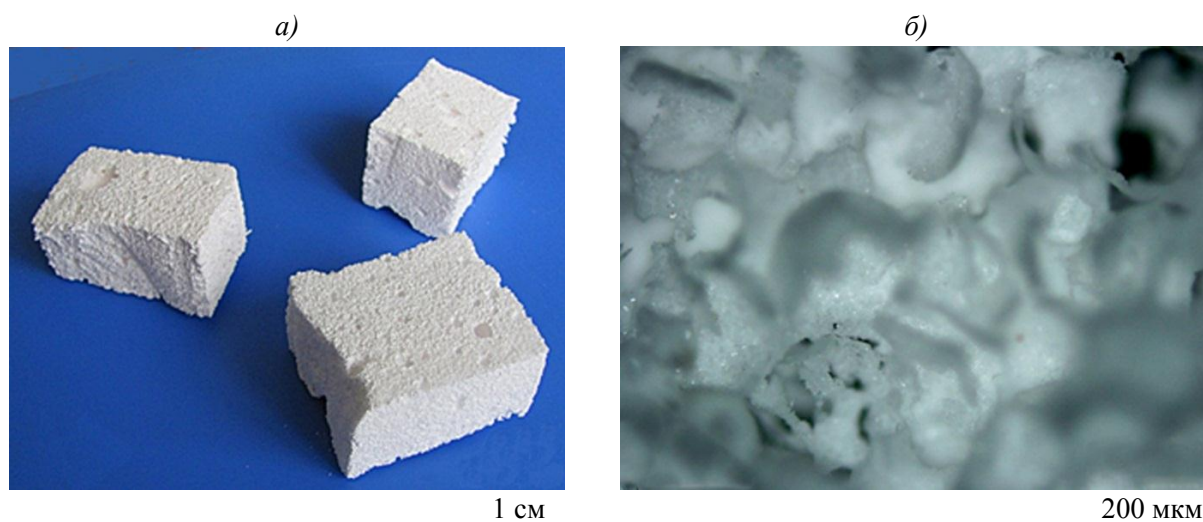


Рис. 6. Образцы ячеистых керамических материалов:
a – общий вид; *б* – оптическая микроскопия (отраженный свет, темное поле)

Таким образом, установлено, что суспензии на основе порошков электрокорунда состава, % (по массе): 65 М40, 20 М20, 10 М10, 5 стекла ХЛ №23 и 16%-ного водного раствора оксихлорида алюминия в области содержания жидкой фазы до 63% (объемн.) – имеют непосредственные контакты между частицами твердой фазы; в пределах содержания жидкой фазы 63–70% (объемн.) – преимущественно коагуляционные контакты, а при $>70\%$ (объемн.) – изолированные скопления частиц твердой фазы. Оптималь-

ными в качестве шликеров являются суспензии с концентрациями технологической связки 63–70% (объемн.), для которых характерно наличие коагуляционных контактов между частицами. Полученные из данных суспензий керамические материалы обладают открытой пористостью до 85% и пределом прочности при сжатии 0,5 МПа. Для достижения в материалах наибольших значений прочности требуется дальнейшая оптимизация состава шликерных суспензий путем подбора электролитов, позволяющих увеличить в шликере объемную долю спекаемых порошков при сохранении приемлемых характеристик вязкости.

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. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля //МиТОМ. 1999. №1. С. 32–34.
3. 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.
4. Aminzare M., Mazaheri M., Golestanifard F., Rezaie H.R., Ajeian R. Sintering behavior of nano alumina powder shaped by pressure filtration //Ceramics International. 2011. №37. P. 9–14.
5. Керамический фильтр, содержащий углеродное покрытие, и способ его изготовления: пат. 2456056 Рос. Федерация; заявл. 28.01.2008; опубл. 20.07.2012 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. Керамический фильтр, содержащий углеродное покрытие, и способ его изготовления: пат. 2456056 Рос. Федерация; заявл. 28.01.2008; опубл. 20.07.2012 Бюл. №20. 15 с.
8. 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.
9. Химическая технология керамики: Уч. пособие для вузов /Под ред. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ Стройматериалы. 2003. 496 с.
10. Анциферов В.Н. Проблемы порошкового материаловедения. Часть II. Екатеринбург: УрО РАН. 2002. 263 с.
11. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
12. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).

13. Sandoval M.L., Camerucci M.A. Foaming performance of aqueous albumin and mullite-albumin systems used in cellular ceramic processing //Ceramics International. 2014. №40. P. 1675–1686.
14. Magnani G., Brentari A., Burrese E., Raiteri G. Pressureless sintered silicon carbide with enhanced mechanical properties obtained by the two-step sintering method //Ceramics International. 2014. № 40. P. 1759–1763.
15. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 2004. 445 с.
16. Практикум и задачник по коллоидной химии /Под ред. В.В. Назарова, А.С. Гродского. М.: Академкнига. 2007. 374 с.
17. Отто М. Современные методы аналитической химии. 2-е изд. М.: Техносфера. 2006. 416 с.
18. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. 2-е изд. М.: Химия. 1989. 464 с.
19. 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.
20. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
21. 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.
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. Технология стекла /Под ред. И.И. Китайгородского. 3-е изд. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1961. С. 517.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A., Morozova G.I. Splavy na osnove aljuminidov nikelja [Alloys on the basis of nickel aluminides] //MiTOM. 1999. №1. С. 32–34.

3. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Nickel foundry hot strength alloys of new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 36–52.
4. Aminzare M., Mazaheri M., Golestanifard F., Rezaie H.R., Ajeian R. Sintering behavior of nano alumina powder shaped by pressure filtration //Ceramics International. 2011. №37. P. 9–14.
5. Keramicheskij fil'tr, sodержashhij uglerodnoe pokrytie, i sposob ego izgotovlenija [The ceramic filter containing carbon covering, and way of its manufacturing]: pat. 2456056 Ros. Federacija; zajavl. 28.01.2008; opubl. 20.07.2012 Bjul. №20. 15 s.
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. Keramicheskij fil'tr, sodержashhij uglerodnoe pokrytie, i sposob ego izgotovlenija [The ceramic filter containing carbon covering, and way of its manufacturing]: pat. 2456056 Ros. Federacija; zajavl. 28.01.2008; opubl. 20.07.2012 Bjul. №20. 15 s.
8. 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.
9. Himicheskaja tehnologija keramiki: Uch. posobie dlja vuzov [Chemical technology of ceramics] /Pod red. I.Ja. Guzmana. M.: OOO RIF Strojmaterialy. 2003. 496 s.
10. Anciferov V.N. Problemy poroshkovogo materialovedenija [Problems of powder materials science]. Chast' II. Ekaterinburg: UrO RAN. 2002. 263 s.
11. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
12. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Perspective reinforcing high-temperature fibers for metal and ceramic composite materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
13. Sandoval M.L., Camerucci M.A. Foaming performance of aqueous albumin and mullite-albumin systems used in cellular ceramic processing //Ceramics International. 2014. №40. P. 1675–1686.
14. Magnani G., Brentari A., Burrese E., Raiteri G. Pressureless sintered silicon carbide with enhanced mechanical properties obtained by the two-step sintering method //Ceramics International. 2014. № 40. P. 1759–1763.
15. Shhukin E.D., Percov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaja himija [Colloid chemistry]. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Vysshaja shkola. 2004. 445 s.
16. Praktikum i zadachnik po kolloidnoj himii [Workshop and the book of problems on colloid chemistry] /Pod red. V.V. Nazarova, A.S. Grodskogo. M.: Akademkniga. 2007. 374 s.
17. Otto M. Sovremennye metody analiticheskoi himii [Modern methods of analytical chemistry]. 2-e izd. M.: Tehnosfera. 2006. 416 s.

18. Frolov Ju.G. Kurs kolloidnoj himii. Poverhnostnye javlenija i dispersnye sistemy [Course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems]. 2-e izd. M.: Himija. 1989. 464 s.
19. Kirienko T.A., Balinova Ju.A. Vlijanie atmosfernoj vlazhnosti na reologiju tonkih sloev koncentrirovannyh vodnyh rastvorov sistemy «neorganicheskie soli–organicheskij polimer» [Influence of atmospheric humidity on rheology of thin coats of the concentrated aqueous solutions of system «inorganic salts-organic polymers»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 56–58.
20. Shhetanov B.V., Balinova Ju.A., Ljuljukina G.Ju., Solov'eva E.P. Struktura i svojstva nepreryvnyh polikristallicheskih volokon α -Al₂O₃ [Structure and properties of continuous polycrystalline fibers α -Al₂O₃] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 13–17.
21. Kirienko T.A., Balinova Ju.A. Fiziko-himicheskie svojstva mnogokomponentnyh rastvorov dlja keramicheskikh materialov, sodержashhij polivinilovyj spirt [Physical and chemical properties of multicomponent solutions for the ceramic materials containing polyvinyl alcohol] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 34–38.
22. Uvarova N.E., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Orlova L.A., Sarkisov P.D. Vysokotemperaturnye radioprozrachnye materialy: segodnja i zavtra [High-temperature radio transparent materials: today and tomorrow] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 16–21.
23. Tehnologija stekla [The technology has flown down] /Pod red. I.I. Kitajgorodskogo. 3-e izd. M.: Gosudarstvennoe izdatel'-stvo literatury po stroitel'stvu, arhitekture i stroitel'nym materialam. 1961. S. 517.