



УДК 532.584:666.37

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-6-6

**К ВОПРОСУ О РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
ШЛИКЕРНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА
АЛЮМИНИЯ**

Н.В. Бучилин

кандидат технических наук

Е.П. Прагер

Август 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.

Н.В. Бучилин¹, Е.П. Прагер¹

К ВОПРОСУ О РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ШЛИКЕРНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Представлены результаты исследований реологических характеристик шликерных суспензий на основе оксида алюминия, предназначенных для изготовления керамических фильтров. Показано, что замена в шликерах воды, используемой в качестве технологической связки, на водный раствор карбамида и оксихлорида алюминия приводит к увеличению текучести суспензий, 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.*

N.V. Buchilin, E.P. Prager

ON RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ALUMINA-BASED SLIP SUSPENSIONS

The results of rheology investigations of alumina-based slip suspensions intended for production of ceramic filters are presented. It was shown that the replacement of water used as a technological binder with the water solution of carbamide and aluminum oxychloride leads to an increase of suspensions fluidity that, in turn, facilitates formability of green bodies and improves mechanical characteristics of ceramic materials. The ranges of ratios between solid phase (sintered powders) and liquid phase (technological binder) providing coagulation and direct contacts between solid phase particles in slips were determined.

Keywords: *rheology, slip, 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

С развитием цветной металлургии возрастают требования к качеству выпускаемых металлов и изделий из них. Одной из самых распространенных причин брака в изделиях из алюминия и его сплавов являются включения примесей (шлак, дресс, оксиды исходных материалов, а также фрагменты огнеупорных материалов), поэтому в ходе процесса производства алюминия присутствующие в расплаве примеси необходимо удалять [1, 2]. Удаление таких включений фильтрацией позволяет создавать однородный расплав и, таким образом, повышает качество выпускаемой продукции [3]. Керамические ячеистые материалы (пенокерамические материалы) на основе оксида алюминия находят применение в качестве носителей катализаторов и фильтров для расплавов металлов. Получение таких материалов основано на пропитке шликером пенополиуретановых (ППУ) губок-каркасов с последующим их обжигом при температурах порядка 1400–1700°C [4–7].

В производстве пенокерамики очень большое значение имеет равномерное распределение шликера в пенополиуретане. Шликерные суспензии должны обладать, с одной стороны, достаточной вязкостью для хорошей пропитки ППУ-губок, с другой – высоким содержанием твердой фазы (спекаемых порошков) для обеспечения образования прочных контактов между частицами в обожженном материале [8–11].

В проведенной ранее работе [12] показано, что наиболее оптимальными для изготовления керамических изделий методом пропитки ППУ-губок являются суспензии с соотношением твердой и жидкой фаз (т/ж), 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 [13, 14]. 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 [15–18].

В работе [12] 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; а >70% (объемн.) – изолированные скопления частиц твердой фазы, что затруд-

няет образование между частицами прочных контактов при спекании. Оптимальными в качестве шликеров для пропитки ППУ-губок 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 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 [19–22]. Данная работа посвящена оптимизации состава шликерных суспензий путем подбора электролитов, позволяющих увеличить объемную долю спекаемых порошков при сохранении приемлемых характеристик вязкости.

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 марки ХЛ №23 [23] с размерами частиц 5–30 мкм. Характеристики исходных порошков представлены в работе [12], проведенной ранее. 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 электрокорунда М40; 20 электрокорунда М20; 10 электрокорунда М10; 5 стекла ХЛ №23.

В качестве технологических связок использовали дистиллированную воду, 16%-ный (по массе) водный раствор оксихлорида алюминия (ОХА) с плотностью 1250 кг/м³, 16%-ный (по массе) водный раствор оксихлорида циркония (ОХЦ) с плотностью 1260 кг/м³, а также модифицированный карбамидом (3%-ный по массе) раствор оксихлорида алюминия (7%-ный по массе) с плотностью 1100 кг/м³.

Исследования эффективной вязкости шликерных суспензий при заданных скоростях деформации проводили на ротационном вискозиметре Anton Paar MCR-501. Определение дифференциальной (пластической) вязкости осуществляли из экспериментальных кривых зависимости скорости деформации суспензий от напряжения сдвига (рис. 1) [15, 16].

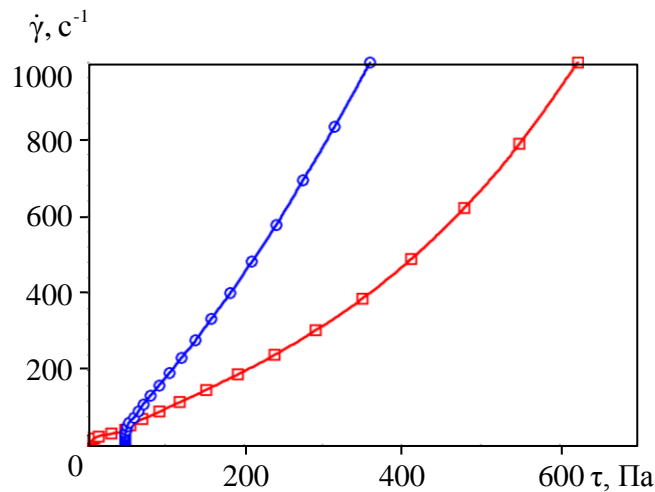


Рис. 1. Влияние напряжения сдвига на скорость деформации суспензий при соотношении порошок/технологическая связка, равным 37:63% (объемн.), с технологической связкой в виде водных растворов оксихлорида алюминия (○) и то же+карбамид (□)

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

Результаты

Для приготовления шликеров использовали следующие технологические связки: воду, водный раствор оксихлорида алюминия, а также водный раствор оксихлорида циркония. Выбор в пользу указанных растворов был сделан по причине того, что при обжиге заготовок оксихлориды алюминия и циркония выступают в качестве спекающих добавок.

На основании данных по реологическому поведению шликерных суспензий установлено, что образование дисперсных систем с коагуляционными контактами происходит в диапазоне содержания жидкой фазы в шликерах от 63 до 70% (объемн.) независимо от вида используемой в качестве технологической связки жидкости (рис. 2). 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 в воде, частицы корунда склонны к седиментации, и при пропитке ППУ-губок такими шликерами во всем диапазоне соотношений воды к по-

рошку происходит осаждение частиц корунда на поверхности губок, что делает невозможным дальнейшее получение материалов из данных шликерных суспензий.

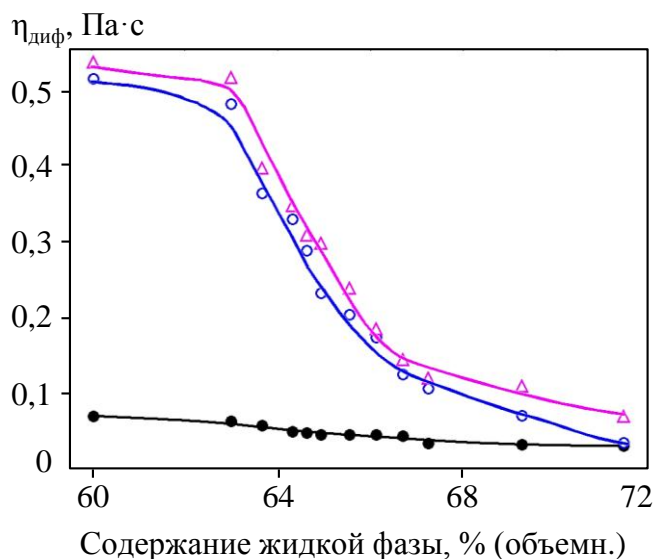


Рис. 2. Влияние объемной доли жидкой фазы в шликерных суспензиях на их дифференциальную вязкость с технологической связкой в виде водных растворов ОХЦ (Δ) и ОХА (○), а также воды (●)

В шликерах, затворенных в растворах ОХА и ОХЦ, частицы порошка корунда не склонны к седиментации, и такие шликеры пропитывают ППУ-губки с образованием заготовок с равномерно распределенной по всему объему керамической массой. Обожженные керамические материалы, полученные с применением раствора оксихлорида алюминия, обладают прочностью при сжатии 0,5 МПа при пористости 85% (объемн.), тогда как материалы, полученные с применением оксихлорида циркония, не набирают прочность при обжиге, поэтому для дальнейших исследований реологических характеристик шликеров и оптимизации их состава использовали только растворы оксихлорида алюминия.

Разбавление 16%-ного (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 ОХА 10% (по массе) 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. Заметной седиментационной устойчивости удалось достичь при добавлении карбамида к раствору ОХА.

Проведенные исследования реологии шликерных суспензий, приготовленных на растворах ОХА и ОХА+карбамид с различным соотношением т/ж, свидетельствуют о различиях в реологических характеристиках данных дисперсных систем. Так, в вы-

бранных диапазонах соотношений т/ж системы на основе раствора оксихлорида алюминия ведут себя как неньютоновские бингамовские жидкости (рис. 1, рис. 3, а), 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. В выбранных диапазонах соотношений т/ж предел текучести для данных дисперсных систем находится в пределах 40–70 Па. Поведение дисперсных систем на основе раствора ОХА+карбамид ближе к идеальным ньютоновским жидкостям (рис. 1, рис. 3, б). Так, предел текучести для них в выбранных диапазонах соотношений т/ж составляет 1–10 Па и увеличивается с увеличением содержания твердой фазы.

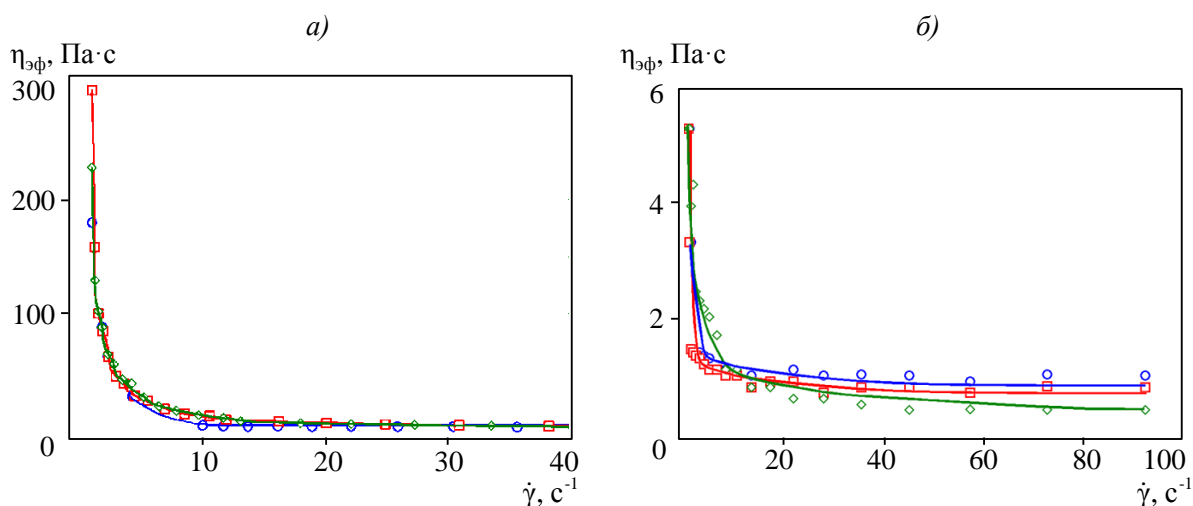


Рис. 3. Зависимость эффективной вязкости шликерных суспензий от скорости деформации при объемном содержании технологической связки в шликере 60 (◇), 65 (□) и 69% (○):
 а – шликеры на водном растворе ОХА; б – то же+карбамид

Дифференциальная вязкость шликерных суспензий закономерно уменьшается с увеличением в них доли жидкой фазы (рис. 4). Значения дифференциальной вязкости шликеров в растворе оксихлорида алюминия ниже, чем шликеров в растворе ОХА+карбамид: 0,06–0,5 и 0,4–1,1 Па·с соответственно. При этом в шликерах в растворе ОХА+карбамид диапазон содержания технологической связки для образования коагуляционно-тиксотропных структур ниже, чем в растворе ОХА, и составляет 59–67% объемн. (ОХА+карбамид) против 63–70% объемн. (ОХА).

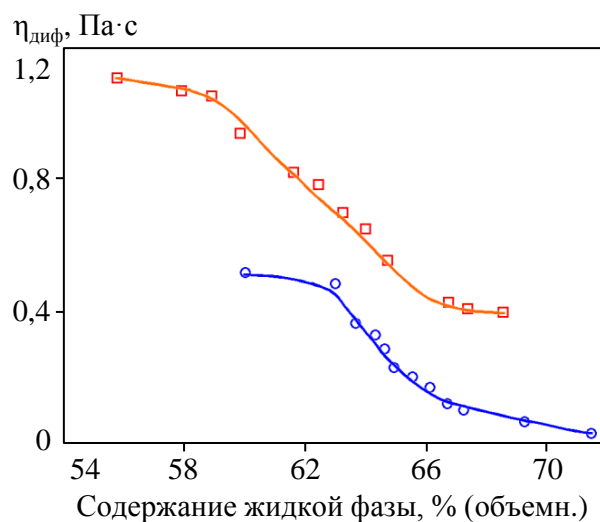


Рис. 4. Влияние объемной доли жидкой фазы в шликерных суспензиях на их дифференциальную вязкость с технологической связкой в виде водных растворов ОХА (○) и ОХА+карбамид (□)

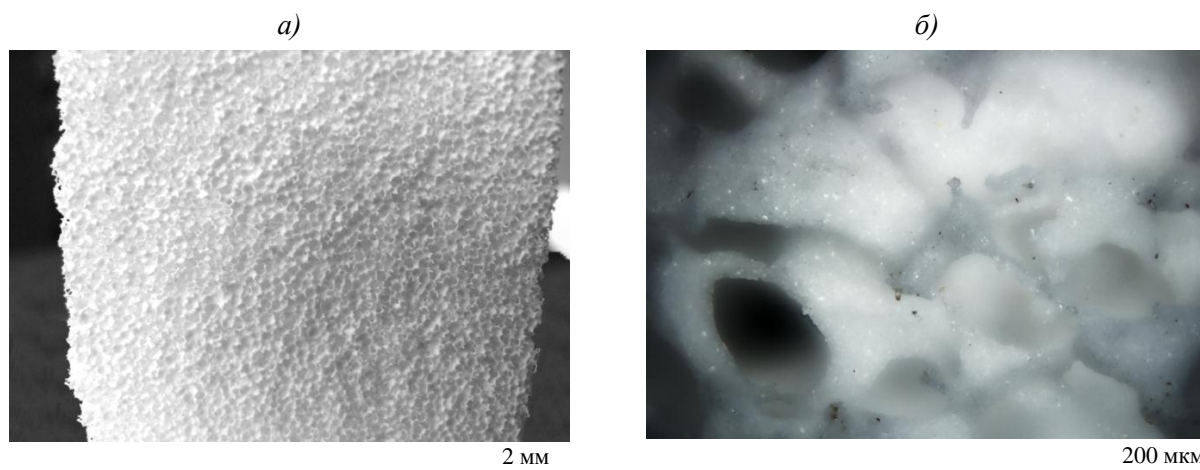


Рис. 5. Поровая структура керамических материалов (оптическая микроскопия, отраженный свет, темное поле)

На основании полученных данных о шликерных суспензиях, в водном растворе ОХА+карбамид, имеющих преимущественно коагуляционные контакты между частицами твердой фазы, получены образцы ячеистых керамических материалов с диаметрами сообщающихся пор 0,2–1 мм (рис. 5). Образцы обладают пористостью на уровне 75–85% (объёмн.) и пределом прочности при сжатии в пределах 1 МПа, что значительно выше, чем у материалов, полученных ранее [12] из шликеров, затворенных в растворе ОХА. Это свидетельствует о возможности использования разработанных шликерных суспензий для получения ячеистых керамических материалов.

Обсуждение и заключения

Кривые зависимости эффективной вязкости суспензий от скорости их деформации показывают, что между частицами твердой фазы возникают силы притяжения, приводящие к образованию пространственного каркаса из самих частиц, находящихся в жидкой среде [16]. В таких системах каркас способен к обратимому разрушению и восстановлению при приложении и снятии нагрузок, что, с одной стороны, способствует текучести шликера и равномерности пропитки, а с другой – удержанию шликера на пенополиуретановых губках [9].

Задачей работы являлось получение шликерных суспензий с высокой долей в них частиц твердой фазы, при этом имеющих коагуляционные контакты между частицами. Проведенные исследования показали, что такими характеристиками обладают шликеры, затворенные в водном растворе ОХА+карбамид. Данные шликеры обладают седиментационной устойчивостью, равномерно пропитывают ППУ-губки, а пенокерамические материалы, полученные из них, обладают прочностью при сжатии на уровне 1 МПа. Однако эти шликеры в диапазоне соотношений т/ж, соответствующем коагуляционным контактам между частицами твердой фазы, обладают наибольшей дифференциальной (пластической) вязкостью: 0,4–1,0 Па·с (см. рис. 4) и близки по реологическому поведению к ньютоновским жидкостям – предел текучести для них составляет 1–10 Па (см. рис. 1). Шликеры, затворенные в воде и растворе оксихлорида алюминия, хотя и обладают меньшими значениями дифференциальной вязкости, однако более склонны к седиментации частиц, поэтому при пропитывании ППУ-губок образуют осадок из порошка корунда в виде корки на поверхности губок.

Суммируя полученные данные по реологии шликерных суспензий можно заключить, что добавление в технологическую связку карбамида приводит к уменьшению толщины двойного электрического слоя частиц твердой фазы [18, 24]. Это снижает вероятность образования коагуляционных контактов между частицами корунда, что приводит к уменьшению общего числа таких контактов в дисперсных системах. Следовательно, не происходит образования прочного каркаса из частиц твердой фазы, поэтому реологическое поведение дисперсных систем 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 твердой фазы, что, в свою очередь, способствует снижению диапазона содержания технологической связки для образования коагуляционно-тиксотропных структур. Это приводит к увеличению дифференциальной вязкости си-

стемы по причине возникновения большего числа контактов между частицами твердой фазы.

Таким образом, установлено, что суспензии на основе порошков электрокорунда и водного раствора оксихлорида алюминия, модифицированного карбамидом, в области содержания жидкой фазы до 59% (объемн.) имеют непосредственные контакты между частицами твердой фазы; в пределах содержания жидкой фазы 59–67% (объемн.) – преимущественно коагуляционные контакты; >67% (объемн.) – изолированные скопления частиц твердой фазы. Оптимальными в качестве шликеров являются суспензии с концентрациями технологической связки 59–67% (объемн.), для которых характерно наличие коагуляционных контактов между частицами. Полученные из данных суспензий керамические материалы обладают открытой пористостью до 85% (объемн.) и пределом прочности при сжатии 1 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 вязкостных 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. 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. №5. 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 Microarc 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. Химическая технология керамики: Уч. пособие для вузов /Под ред. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ Стройматериалы. 2003. 496 с.
9. Анциферов В.Н. Проблемы порошкового материаловедения. Часть II. Екатеринбург: УрО РАН. 2002. 263 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. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
12. Бучилин Н.В., Прагер Е.П. Реологические характеристики шликерных суспензий на основе оксида алюминия //Труды ВИАМ. 2015. №5. Ст. 06 (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., Buresi 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. Шукин 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 α -Al₂O₃ //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., Гращенко Д.В., Исаева Н.В., Орлова Л.А., Саркисов П.Д. Высоко-температурные 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.
24. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб: Профессия. 2007. 560 с.

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). S. 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. S. 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] //Авиационные материалы и технологии. 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 Microarc 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. Himicheskaja tehnologija keramiki [Chemical technology of ceramics]: Uch. posobie dlja vuzov /Pod red. I.Ja. Guzmana. M.: OOO RIF Strojmaterialy. 2003. 496 s.
9. Anciferov V.N. Problemy poroshkovogo materialovedenija [Problems of powder materials science]. Chast' II. Ekaterinburg: UrO RAN. 2002. 263 s.
10. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
11. 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).
12. Buchilin N.V., Prager E.P. Reologicheskie harakteristiki shlikernyh suspenzij na osnove oksida aljuminija [Rheological characteristics of slip suspensions on the basis of aluminum oxide] //Trudy VIAM. 2015. №5. St. 06 (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., Burresi 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 analiticheskoj 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, sodержashhih 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.
 24. Malkin A.Ja., Isaev A.I. Reologija: koncepcii, metody, prilozhenija [Rheology: concepts, methods, appendices]. SPb: Professija. 2007. 560 s.