

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-85-103

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ СМАЧИВАЮЩЕ-ДИСПЕРГИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

А.В. Бутузов<sup>1</sup>, Ю.Е. Лебедева<sup>1</sup>, А.В. Семина<sup>1</sup>, Е.А. Серкова<sup>1</sup>, С.Л. Лонский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние природы и концентрации смачивающе-диспергирующих добавок на реологические свойства и стабильность модельных керамических суспензий на основе (мет)акрилатной смолы и оксида алюминия. Изучено влияние массовой доли оксида алюминия на реологическое поведение и стабильность керамических суспензий. Получены стабильные высоконаполненные керамические суспензии с содержанием частиц оксида алюминия 51,5; 55,4 и 60,0 % (объемн.) и низкой вязкостью (2,16; 4,09 и 6,06 Па·с при скорости сдвига  $30 \text{ с}^{-1}$  и температуре 25 °С).

**Ключевые слова:** оксид алюминия, керамические суспензии, аддитивные технологии, смачивающе-диспергирующие добавки, реология, седиментация

**Для цитирования:** Бутузов А.В., Лебедева Ю.Е., Семина А.В., Серкова Е.А., Лонский С.Л. Влияние природы и концентрации смачивающе-диспергирующей добавки на реологические свойства и стабильность высоконаполненных керамических суспензий на основе оксида алюминия // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 85–103. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-85-103.

Scientific article

## INFLUENCE OF THE NATURE AND CONCENTRATION OF THE WETTING-DISPERSING ADDITIVE ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND STABILITY OF HIGHLY FILLED CERAMIC SLURRIES BASED ON ALUMINUM OXIDE

A.V. Butuzov<sup>1</sup>, Yu.E. Lebedeva<sup>1</sup>, A.V. Semina<sup>1</sup>, E.A. Serkova<sup>1</sup>, S.L. Lonskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article investigates the effect of the nature and concentration of wetting and dispersing additives on the rheological properties and stability of model ceramic slurries based on (meth)acrylate resin and aluminum oxide. The influence of the mass fraction of aluminum oxide on the rheology and stability of ceramic slurries is presented. Stable highly filled ceramic slurries with an alumina particle content of 51,5; 55,4 and 60,0 vol. % and low viscosity 2,16; 4,09 and 6,06 Pa·s at a shear rate of  $30 \text{ s}^{-1}$  at a temperature of 25 °C were obtained.

**Keywords:** aluminum oxide, ceramic slurries, additive technologies, wetting and dispersing additives, rheology, sedimentation

**For citation:** Butuzov A.V., Lebedeva Yu.E., Semina A.V., Serkova E.A., Lonskii S.L. Influence of the nature and concentration of the wetting-dispersing additive on the rheological properties and stability of highly filled ceramic slurries based on aluminum oxide. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 85–103. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-85-103.

## Введение

Благодаря комплексу высоких физико-механических, теплоизоляционных и электрических характеристик, хорошей термостойкости, отличной коррозионной стойкости и биосовместимости [1, 2] материалы на основе оксида алюминия получили широкое распространение в самых разных областях промышленности, особенно в аэрокосмической, электротехнической, биоинженерной, стоматологической и др. [3–7]. Из алюмооксидной керамики изготавливают изделия вакуумплотной керамики, подложки для микроэлектроники, керамические топливные элементы, изоляторы, пьезоэлектрические материалы, тонкостенные стержни со сложной формой для литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей и др. [8, 9]. В настоящее время потребность в алюмооксидной керамике с большой удельной площадью поверхности и сложной структурой постепенно возрастает по мере улучшения характеристик устройств [10, 11]. Однако традиционные технологии производства сталкиваются с рядом ограничений при изготовлении сложнопрофильных керамических изделий, особенно микродеталей [12–16].

В связи с этим перспективной задачей представляется использование новых методов, таких как аддитивные технологии [17–20], которые позволили бы получить керамические изделия любой сложности и исключить механическую обработку керамики из производственного цикла, что существенно снизит трудоемкость и продолжительность технологического процесса. В настоящее время методы фотополимеризации в ванне (Vat-photopolymerization – VP), такие как лазерная стереолитография (Stereolithography apparatus) и цифровая обработка светом (Digital light processing – DLP), наиболее распространены среди технологий аддитивного производства в области изготовления керамических материалов [21]. Данные методы позволяют изготавливать высокоэффективную керамику, изделия сложной конфигурации с относительной плотностью >99 % и свойствами, сравнимыми со свойствами деталей, полученных традиционными методами [22, 23]. Однако аддитивные технологии не лишены ограничений и недостатков, которые усложняют процесс получения керамических изделий [24].

Для аддитивного производства керамических изделий с помощью метода VP разработка стабильной фотоотверждаемой керамической суспензии с высоким содержанием частиц и низкой вязкостью имеет особое значение [25]. Для решения данной задачи необходимо учитывать влияние многих факторов, таких как природа, форма и распределение по размерам керамических частиц; объемная концентрация керамического порошка; природа, состав и вязкость дисперсионной среды и др. Все перечисленные факторы влияют на реологические свойства фотоотверждаемой керамической суспензии, такие как вязкость, «разжижение» или «загущение» при сдвиге, критическая скорость сдвига, предел текучести, тиксотропия и реопексия. В качестве дисперсионной среды в составе керамических суспензий для VP-процесса обычно используют фотоотверждаемое полимерное связующее, которое состоит в основном из смеси мономеров и/или олигомеров, имеющих светоотверждаемые функциональные группы, и фотоинициаторов [25–27]. Важным фактором является выбор смачивающе-диспергирующих и/или модифицирующих поверхность керамических частиц добавок, обеспечивающих одновременно более низкую вязкость, высокое наполнение и стабильность фотоотверждаемой керамической суспензии [25].

Однако следует отметить, что исследования реологического поведения фотоотверждаемой керамической суспензии немногочисленны, а изучение взаимосвязи между типом смачивающе-диспергирующих добавок, объемной концентрацией керамических частиц и реологическим поведением является актуальной задачей. Так, например, в работе [28] исследовано влияние природы и концентрации диспергаторов на реологические свойства и седиментационную устойчивость керамической суспензии на основе  $Al_2O_3$ . В результате разработан стабильный состав с содержанием 5 % (по массе)

сополимера с кислотными группами (KOS110) в качестве диспергатора, который имел высокое количество керамических частиц (60 % (объемн.)) и вязкость 15,4 Па·с при скорости сдвига  $200 \text{ с}^{-1}$ .

Авторы работы [29] исследовали влияние диспергирующей способности различных дикарбоновых кислот, содержащих от трех до десяти атомов углерода, на стабильность, вязкость и реологическое поведение керамических суспензий оксида алюминия. Отмечено, что в зависимости от длины цепи дикарбоновой кислоты возможно получить керамические суспензии с различной псевдопластичностью, стабильностью, вязкостью и «разжижением» при сдвиге. В качестве оптимального варианта для процесса диспергирования частиц выбрана себациновая кислота, которая при содержании 0,4 % (по массе) позволила получить керамическую суспензию с наиболее низкой вязкостью (1,62 Па·с при скорости сдвига  $30 \text{ с}^{-1}$ ) и содержанием порошка 45 % (объемн.).

Другие исследования [30–37] влияния перечисленных факторов на реологические свойства суспензий показали, что получение седиментационно-стабильной фотоотверждаемой суспензии с высоким содержанием оксида алюминия (>50 % (объемн.)) и низкой вязкостью (<10 Па·с в диапазоне скоростей сдвига  $30\text{--}100 \text{ с}^{-1}$ ) представляет собой трудную задачу.

В данной работе представлены результаты изучения реологического поведения и процесса седиментации дисперсий с целью получения стабильной во времени, низковязкой, высоконаполненной, фотоотверждаемой керамической суспензии, пригодной для синтеза керамических изделий по технологии DLP. Подробно исследовано влияние природы и концентрации смачивающе-диспергирующих добавок, а также концентрации частиц дисперсной фазы на реологическое поведение керамических суспензий.

### Материалы и методы

В данной работе объектом исследования служила модельная система, в которой в качестве дисперсионной среды использовали (мет)акрилатную смолу на основе смеси уретандиметакрилата (до 70 % (по массе)) и низкомолекулярного и, соответственно, относительно низковязкого диакрилата дипропиленгликоля (от 30 до 90 % (по массе)). Смола представляла собой прозрачную жидкость плотностью  $1,051 \text{ г/см}^3$  и вязкостью 82,8 мПа·с при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Низкая вязкость среды позволила провести эксперименты в комфортных условиях при комнатной температуре и добиться хорошей воспроизводимости результатов.

В качестве дисперсной фазы использовали смесь порошков оксида алюминия с бимодальным распределением частиц по размеру – от субмикронного до микронного. Соотношение долей порошка с частицами субмикронного и микронного размера варьируется в пределах от 1:1 до 1:2,5. Структура порошка и размер частиц показаны на рис. 1.

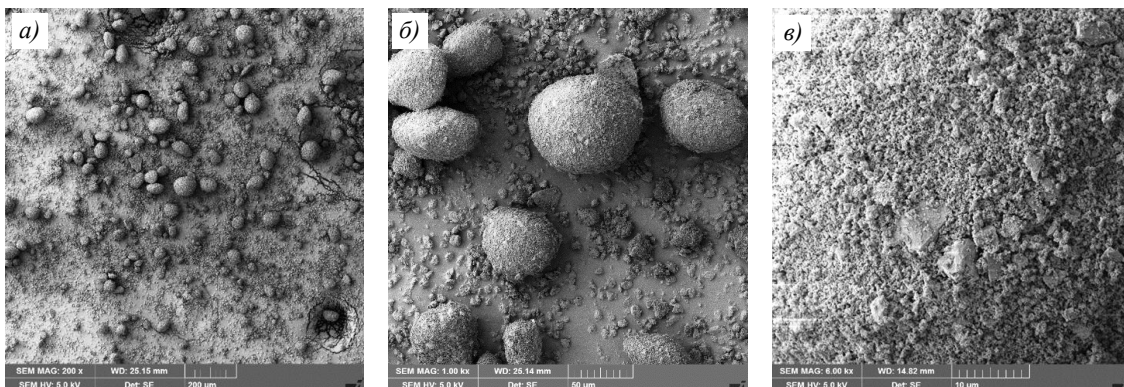


Рис. 1. Микроструктура порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , используемого для приготовления керамических суспензий, при увеличениях  $\times 200$  (а),  $\times 1000$  (б) и  $\times 6000$  (в)

В качестве смачивающе-диспергирующих добавок выбраны: моноэфир орто-фосфорной кислоты и длинноцепочечного алифатического спирта (диспергатор 1), сложный эфир карбоновой кислоты (диспергатор 2), раствор электронейтральной соли поликарбоновой кислоты с производными амина (диспергатор 3), раствор гидроксил функциональной алкиламмониевой соли кислого полиэфира в 2-феноксиэтаноле (диспергатор 4), сополимер с пигмент-аффинными группами (диспергатор 5), алкиламмониевая соль эфира фосфорной кислоты (диспергатор 6), сегментированный сополимер и соль алкилгидроксил аммония с кислотными группами (диспергатор 7).

Модельные керамические дисперсии изготавливали путем смешения смолы, смачивателей-диспергаторов и оксида алюминия. В чистую и сухую полиэтиленовую банку объемом 20 мл с плотно закручивающейся крышкой загружали расчетное количество (мет)акрилатной жидкой смолы, диспергатора (3 % (по массе) от содержания керамического порошка) и смеси порошков оксида алюминия. Содержание дисперсной фазы в составах композиций варьировали от 30 до 85 % (по массе). Перемешивание проводили в орбитально-планетарном смесителе при скорости  $2200 \text{ мин}^{-1}$  в течение 30 с (рис. 2).

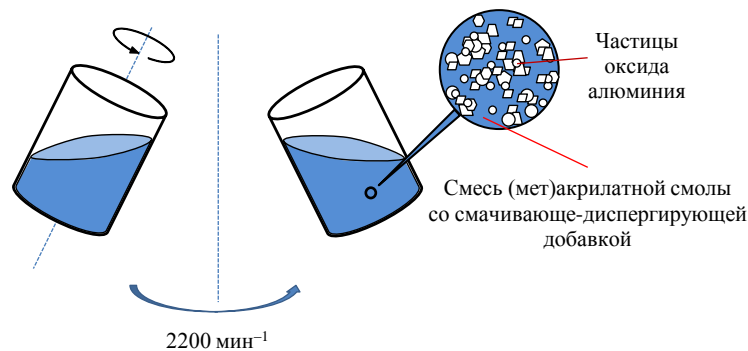


Рис. 2. Схематическое изображение смешения компонентов керамической дисперсии в орбитально-планетарном смесителе

Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме вторичных электронов при увеличениях от  $\times 200$  до  $\times 6000$ .

Реологические исследования модельных композиций проводили на реометре в рабочем узле «плоскость–плоскость» в соответствии с ГОСТ 25276–82 при температуре  $25,0 \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Метод заключается в том, что исследуемый образец помещается в малый зазор между двумя поверхностями, необходимый для сдвига исследуемой среды – модельной композиции. Одна из поверхностей на протяжении всего опыта остается неподвижной, другая совершает вращение с постоянной скоростью. Измерительный зазор составил 1 мм.

Стабильность керамических суспензий на основе порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  измеряли с помощью статического седиментационного испытания путем загрузки суспензии в пробирку объемом 2 мл, как показано на рис. 3. Для оценки стабильности суспензии после проведения опытов по седиментации в течение определенного времени регистрировали высоту верхней отделившейся фазы смолы ( $H_1$ ) по отношению к начальной высоте суспензии ( $H_0$ ). Затем рассчитывали значение соотношения  $H_1/H_0$  для оценки стабильности суспензии. Очевидно, что чем выше значение  $H_1/H_0$ , тем меньше стабильность суспензии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

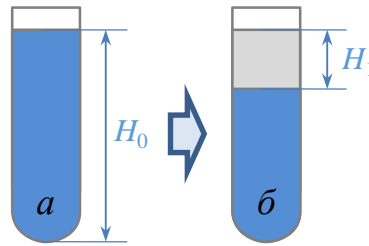


Рис. 3. Пробирка с керамической суспензией до (а) и после (б) седиментации

### Результаты и обсуждение

#### *Влияние природы смачивающе-диспергирующей добавки на седиментационную устойчивость и реологическое поведение керамических суспензий*

Одним из ключевых требований аддитивного производства высококачественных деталей из керамики с применением процессов фотополимеризации в ванне являются однородность и седиментационная стабильность фотоотверждаемых керамических суспензий на протяжении длительного времени. Использование нестабильных керамических суспензий, особенно при длительном процессе печати, будет приводить к значительной неоднородности и разнице концентраций частиц порошка в слоях «зеленых» заготовок деталей, что впоследствии будет вызывать расслоение и разрушение изделий в процессе выжигания связующего. Можно выделить два основных механизма процесса седиментации керамических частиц – под действием гравитационных сил и за счет флокуляции мелких керамических частиц. Таким образом, скорость седиментации, т. е. скорость осаждения частиц, является результатом равновесия вязкостных и гравитационных сил. В работе [38] представлено модифицированное уравнение Стокса, в котором учитывается влияние объемного содержания дисперсной фазы:

$$v_c = v_{\text{Стокса}} (1 - \varphi)^{4,65} = \frac{d^2 (\rho_{\text{частиц}} - \rho_{\text{среды}}) g}{18 \eta_{\text{среды}}} (1 - \varphi)^{4,65},$$

где  $v_c$  – скорость осаждения частиц;  $v_{\text{Стокса}}$  – скорость Стокса;  $d$  – диаметр частиц;  $\varphi$  – объемная доля дисперсной фазы;  $\rho_{\text{частиц}}$  – плотность дисперсной фазы;  $\rho_{\text{среды}}$  – плотность дисперсионной среды;  $\eta_{\text{среды}}$  – вязкость дисперсионной среды;  $g$  – ускорение свободного падения.

Хотя данное уравнение описывает поведение частиц размером  $>100$  мкм, с его использованием можно вывести некоторые общие принципы. Повышению седиментационной стабильности будут способствовать следующие факторы: уменьшение диаметра частиц, разности плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды, увеличение вязкости дисперсионной среды и объемной доли дисперсной фазы. Поскольку для изготовления керамических деталей методом DLP используются фотоотверждаемые керамические суспензии с высоким содержанием частиц размером намного меньше 100 мкм, с помощью данного уравнения была бы получена незначительная скорость их седиментации. Однако для коллоидных суспензий закон Стокса не применим, поскольку из-за размера частиц уменьшается их сила тяжести, а взаимодействие между частицами, броуновское движение и диффузия становятся более значимыми факторами. Соответственно, для керамических суспензий, содержащих подверженные флокуляции частицы, выбор смачивающе-диспергирующих добавок имеет основополагающее значение для минимизации притяжения между частицами и поддержания устойчивости взвеси.

Приготовлены керамические суспензии с содержанием 30 % (по массе) оксида алюминия с разными типами диспергаторов, концентрация которых составила 3 % (по

массе) от содержания керамического порошка в составе композиции. В ходе эксперимента в течение 5 дней фиксировали изменение границы отделившейся фазы ( $H_1$ ). На основе полученных данных построен график зависимостей объемного седиментационного соотношения  $H_1/H_0$  от продолжительности эксперимента (рис. 4).

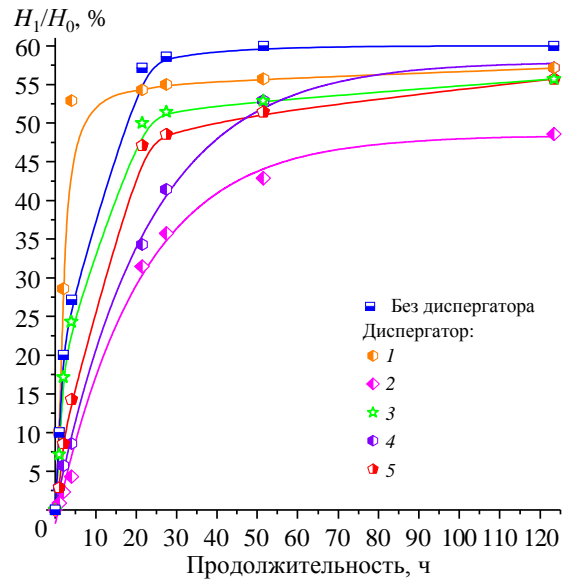


Рис. 4. Зависимости объемного седиментационного соотношения  $H_1/H_0$  от продолжительности эксперимента для модельных составов керамических суспензий с содержанием 30 % (по массе)  $Al_2O_3$  и различными смачивающе-диспергирующими добавками

Во всех случаях (как без смачивающе-диспергирующих добавок, так и с их использованием) происходило быстрое осаждение частиц микронного размера. При этом наибольшую седиментационную устойчивость показали керамические суспензии, содержащие диспергаторы 6 и 7, у которых не наблюдали четкой границы раздела фаз. Даже спустя 30 сут они демонстрировали высокую стабильность (рис. 5). Керамические суспензии, содержащие другие смачивающе-диспергирующие добавки, подвергались значительной коагуляции частиц субмикронного размера и проявляли плохую седиментационную устойчивость. Таким образом, можно предположить, что в следующем ряду смачивающе-диспергирующих добавок скорость седиментации уменьшалась:  $1 > 3 > 5 > 4 > 2 > 6 \approx 7$ . Следует отметить, что в случае диспергатора 1 первые 10 ч наблюдали наиболее быстрое осаждение частиц, но в дальнейшем процесс замедлялся и даже спустя 720 ч часть частиц оставалась в виде взвеси, в то время как для диспергаторов 2–5 процесс полностью прекращался.

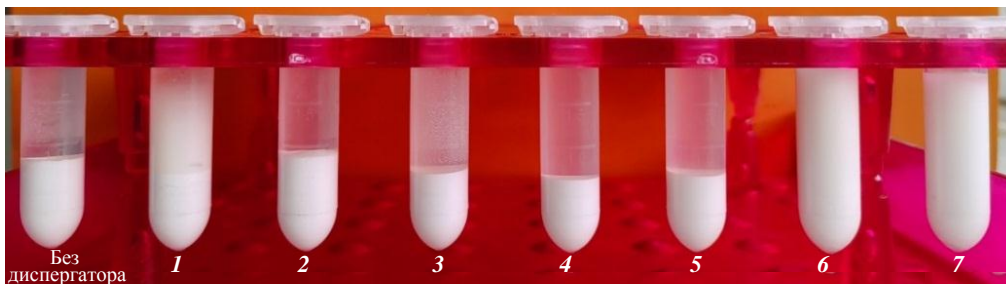


Рис. 5. Керамические суспензии с содержанием 30 % (по массе)  $Al_2O_3$  и смачивающе-диспергирующими добавками 1–7 после седиментации в течение 720 ч

На основании данных реологического анализа суспензий построены графики зависимостей вязкости и течения (рис. 6). Реологическое поведение данных суспензий хорошо описывается с помощью модели Гершеля–Балкли (рис. 6, б, в):

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n,$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\tau_0$  – предел текучести (показывает наличие у суспензии пространственной структуры, вызванной силами Ван-дер-Ваальса, полярным взаимодействием и др.);  $K$  – показатель консистенции;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига;  $n$  – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения (если  $n < 1$ , то дисперсия проявляет «разжижение» при сдвиге, если  $n > 1$  – «загущение»).

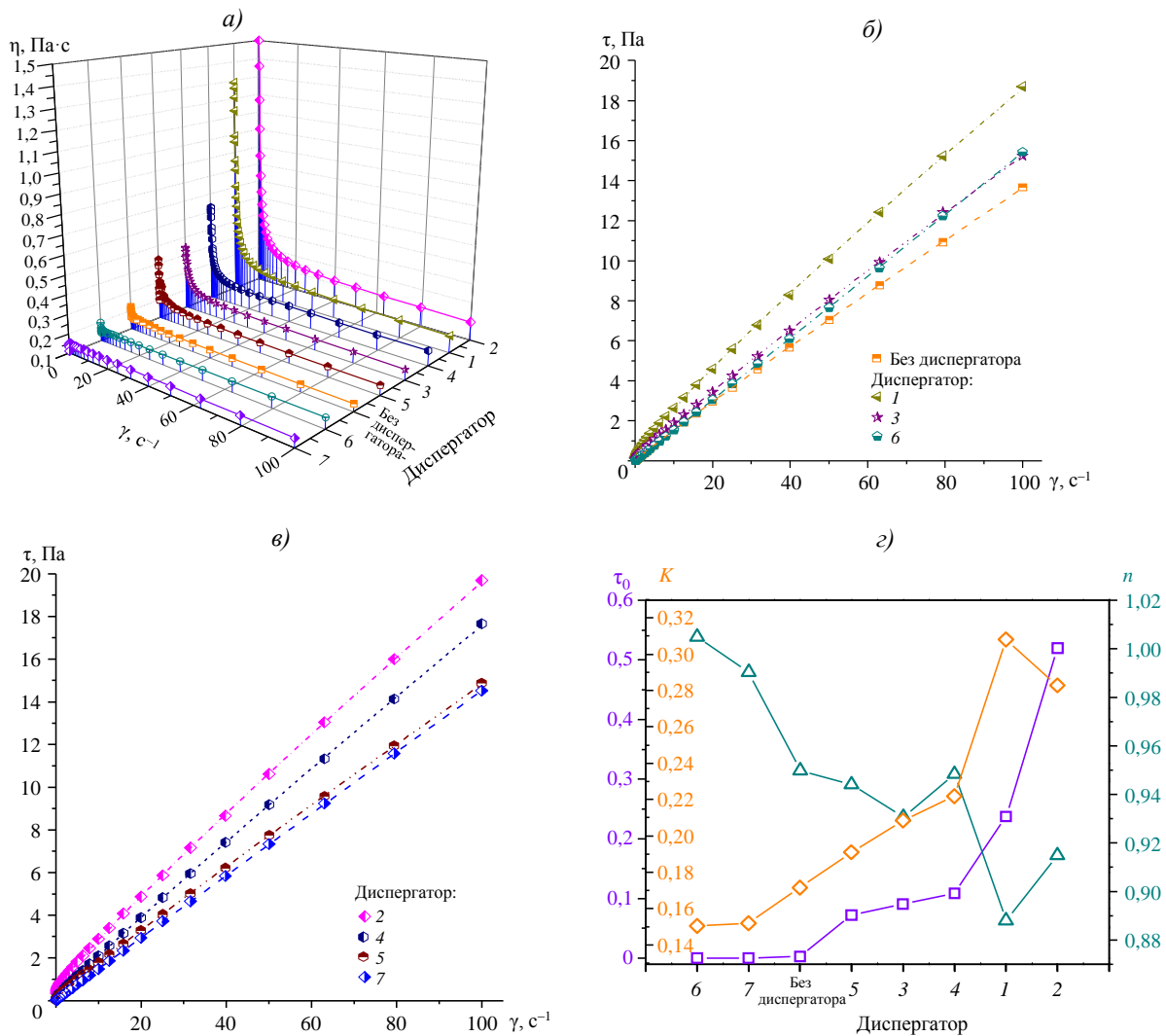


Рис. 6. Влияние природы смачивающе-диспергирующих добавок на реологическое поведение керамических суспензий: а – зависимости динамической вязкости  $\eta$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ ; б, в – зависимости напряжения  $\tau$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  (пунктирными линиями показана аппроксимация с использованием модели Гершеля–Балкли); г – зависимости параметров модели Гершеля–Балкли от природы диспергатора ( $\tau_0$  – предел текучести,  $K$  – показатель консистенции,  $n$  – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения)

В результате проведенной аппроксимации экспериментальных данных вычислены эмпирические параметры модели Гершеля–Балкли (табл. 1). Высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 \geq 0,9999$ ) свидетельствует о хорошей сходимости экспериментальных данных с расчетными. На основе полученных значений построены

графики зависимостей параметров модели от природы смачивающе-диспергирующей добавки в составе фотоотверждаемой керамической суспензии (рис. 6, з). В ряду диспергаторов  $7 \approx 6 < 5 < 3 < 4 < 1 < 2$  предел текучести увеличивается, что свидетельствует об усилении взаимодействия между частицами оксида алюминия с образованием пространственных структур. Керамические суспензии, содержащие диспергаторы 6 и 7, демонстрировали реологическое поведение, наиболее близкое к ньютоновскому течению. В других случаях (как с диспергатором, так и без его использования) суспензии проявляли пластичное течение. Показатель консистенции возрастает в ряду диспергаторов  $6 < 7 < 5 < 3 < 4 < 2 < 1$ , который является практически идентичным ряду увеличения предела текучести.

Таблица 1

**Параметры модели Гершеля–Балкли для керамических суспензий со смачивающе-диспергирующими добавками различной природы**

| Параметры | Значения параметров для суспензии |                 |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-----------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | без диспергатора                  | с диспергатором |        |        |        |        |        |        |
|           |                                   | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      |
| $\tau_0$  | 0,0029                            | 0,2375          | 0,5197 | 0,0907 | 0,1084 | 0,0722 | 0      | 0      |
| $K$       | 0,1716                            | 0,3080          | 0,2827 | 0,2084 | 0,2218 | 0,1910 | 0,1504 | 0,1520 |
| $n$       | 0,9498                            | 0,8880          | 0,9148 | 0,9306 | 0,9483 | 0,9440 | 1,0049 | 0,9903 |
| $R^2$     | 0,9999                            | 0,9999          | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 1,0000 |

Примечание.  $\tau_0$  – предел текучести;  $K$  – показатель консистенции;  $n$  – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения;  $R^2$  – коэффициент детерминации.

***Влияние природы смачивающе-диспергирующей добавки и содержания дисперсной фазы на реологическое поведение и стабильность керамических суспензий***

Содержание частиц оксида алюминия в составе фотоотверждаемой керамической суспензии имеет основополагающее значение для процесса DLP. Только высокое содержание частиц  $Al_2O_3$  позволит изготовить высокоплотное изделие из алюмооксидной керамики с низкой усадкой без дефектов типа расслоений и трещин. Содержание керамических частиц значительно влияет на вязкость, реологическое поведение и свойства керамических дисперсий, такие как предел текучести и критическое напряжение сдвига. Поскольку объемная доля керамического порошка в составе суспензии обратно пропорциональна ее вязкости, важно найти компромисс между этими показателями.

Приготовлены керамические суспензии с содержанием от 60 до 85 % (по массе) оксида алюминия без смачивающе-диспергирующей добавки и с диспергаторами 1–6, концентрация которых составляла 3 % (по массе) от содержания керамического порошка в составе композиции. Результаты проведенных реологических испытаний данных суспензий в диапазоне скоростей сдвига от 0 до  $100 \text{ с}^{-1}$  представлены на рис. 7. Несмотря на то что (мет)акрилатная смола, которая является дисперсионной средой, проявляет ньютоновское течение при сдвиге, изготовленные на ее основе керамические суспензии обладали неньютоновским поведением из-за диспергированных частиц оксида алюминия бимодального распределения. Керамические суспензии без смачивающе-диспергирующей добавки характеризовались сложным реологическим поведением с типичным «разжижением» при сдвиге (рис. 7, а). Реологическое поведение керамических суспензий, проявляющих «разжижение» при сдвиге, является предпочтительным для технологии DLP, поскольку оно препятствует седиментации частиц в состоянии покоя и способствует надлежащему течению суспензии при сдвиге. Однако в данном случае для керамических суспензий с содержанием оксида алюминия  $>70$  % (по массе)

кривые зависимостей имеют участок «загущения» при низких скоростях сдвига ( $1,0\text{--}2,5\text{ с}^{-1}$ ), что может отрицательно сказаться на изготовлении изделия в ходе 3D-печати при подъеме и опускании платформы построения в ванну с суспензией. Суспензии с диспергаторами 1 и 2 (рис. 7, б, в) также имеют подобное сложное реологическое поведение, однако эффект «загущения» при малых скоростях сдвига в них усиливается. Керамические суспензии с диспергаторами 3–7 (рис. 7, г–з) проявляли вязкопластичное течение, которое хорошо описывается с помощью модели Гершеля–Балкли.

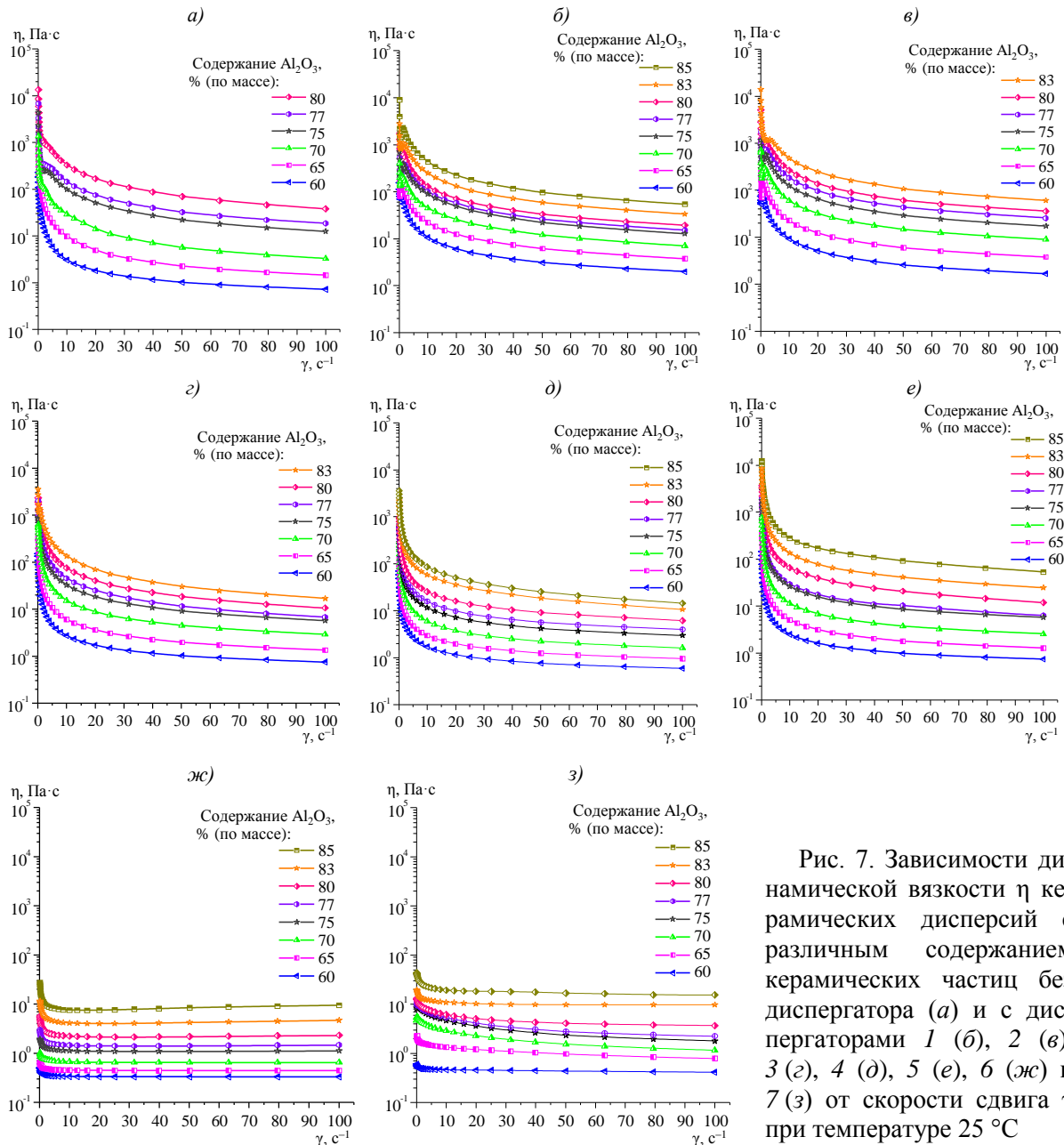


Рис. 7. Зависимости динамической вязкости  $\eta$  керамических дисперсий с различным содержанием керамических частиц без диспергатора (а) и с диспергаторами 1 (б), 2 (в), 3 (г), 4 (д), 5 (е), 6 (ж) и 7 (з) от скорости сдвига  $\gamma$  при температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для оценки влияния смачивающе-диспергирующих добавок на зависимости вязкости суспензий от содержания керамических частиц построен график, представленный на рис. 8. Для всех керамических суспензий характерно экспоненциальное возрастание вязкости при достижении предельного наполнения системы керамическим порошком.

Данное явление можно объяснить доминированием физико-химических взаимодействий над объемным фактором и агрегированием отдельных керамических частиц при переходе в область высоких концентраций керамического порошка в составе суспензии. Важно отметить, что все смачивающе-диспергирующие добавки позволяют увеличить содержание керамического порошка в системе и получить более наполненные композиции по сравнению с композициями, в которых данные добавки не использовались. При этом диспергаторы 1 и 2 оказывали эффект «загущения», суспензии с содержанием до 75 % (по массе) керамических частиц представляли собой густые пастообразные композиции. Наиболее перспективной из представленных смачивающе-диспергирующих добавок оказался диспергатор б, с которым керамические суспензии проявляли наименьшие значения вязкости во всем исследуемом диапазоне концентраций частиц оксида алюминия.

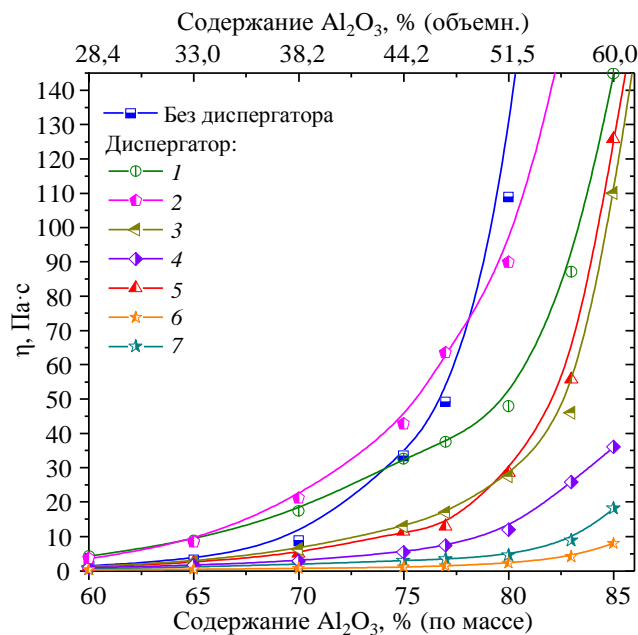


Рис. 8. Влияние природы смачивающе-диспергирующих добавок на зависимости динамической вязкости  $\eta$  модельных составов керамических суспензий (при скорости сдвига  $30 \text{ с}^{-1}$  и температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) от содержания порошка оксида алюминия

Многие научные коллективы [25, 39] для описания влияния объемной доли керамических частиц на вязкость суспензий использовали различные модели, например Кригера–Даферти, Бринкмана–Росоу, Муни и др. В данной работе для описания этого влияния использовано уравнение Лю [40]:

$$\eta_r = \eta_{\text{сусп}}/\eta_{\text{среды}} = [a(\varphi_{\text{max}} - \varphi)]^{-n},$$

где  $\eta_r$  – относительная вязкость;  $\eta_{\text{сусп}}$  – вязкость суспензии;  $\eta_{\text{среды}}$  – вязкость среды;  $\varphi$  – объемная доля керамических частиц;  $\varphi_{\text{max}}$  – предельное значение объемной доли керамических частиц (максимальное уплотнение);  $a, n$  – эмпирически подобранные константы.

Экспериментально полученная зависимость динамической вязкости керамических суспензий, содержащих диспергатор б, от объемной доли частиц оксида алюминия имеет высокое согласование с моделью Лю ( $R^2 = 0,9997$ ) и может быть представлена в виде уравнения

$$\eta_r = [3,1751 \cdot (0,702 - \varphi)]^{-2,1496}.$$

Для понимания влияния объемной доли керамических частиц на реологическое поведение керамических суспензий, содержащих диспергатор б, аппроксимированы экспериментальные данные и вычислены эмпирические параметры модели Гершеля–Балкли (табл. 2). Высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 \geq 0,9994$ ) свидетельствует о хорошей сходимости экспериментальных данных с расчетными. На основе полученных значений построены графики зависимостей параметров модели от содержания порошка оксида алюминия в составе композиции (рис. 9). С увеличением содержания керамических частиц показатели  $K$ ,  $n$  и  $\tau_0$  повышаются. Таким образом, можно утверждать, что с увеличением массовой доли керамических частиц в составе суспензии не только повышается вязкость суспензии, но также изменяется ее реологическое поведение от ньютоновского к дилатантному с возрастанием прочности начальной структуры.

Таблица 2

Параметры модели Гершеля–Балкли для керамических суспензий, содержащих 60–85 % (по массе) оксида алюминия и 3 % (по массе) диспергатора б

| Параметры | Значения параметров для суспензий с содержанием $Al_2O_3$ , % (по массе) |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 60   | 65     | 70     | 75     | 77     | 80     | 83     | 85     |
| $\tau_0$  | 0,0476   | 0,0748 | 0,1509 | 0,4317 | 0,7107 | 1,5558 | 3,9273 | 7,4223 |
| $K$       | 0,3281   | 0,4393 | 0,6409 | 0,9883 | 1,2142 | 1,6812 | 2,5747 | 4,3805 |
| $n$       | 1,0026   | 1,0032 | 1,0044 | 1,0264 | 1,0412 | 1,0687 | 1,1279 | 1,1670 |
| $R^2$     | 0,9999   | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9998 | 0,9996 | 0,9994 | 0,9996 |

Примечание.  $\tau_0$  – предел текучести;  $K$  – показатель консистенции;  $n$  – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения;  $R^2$  – коэффициент детерминации.

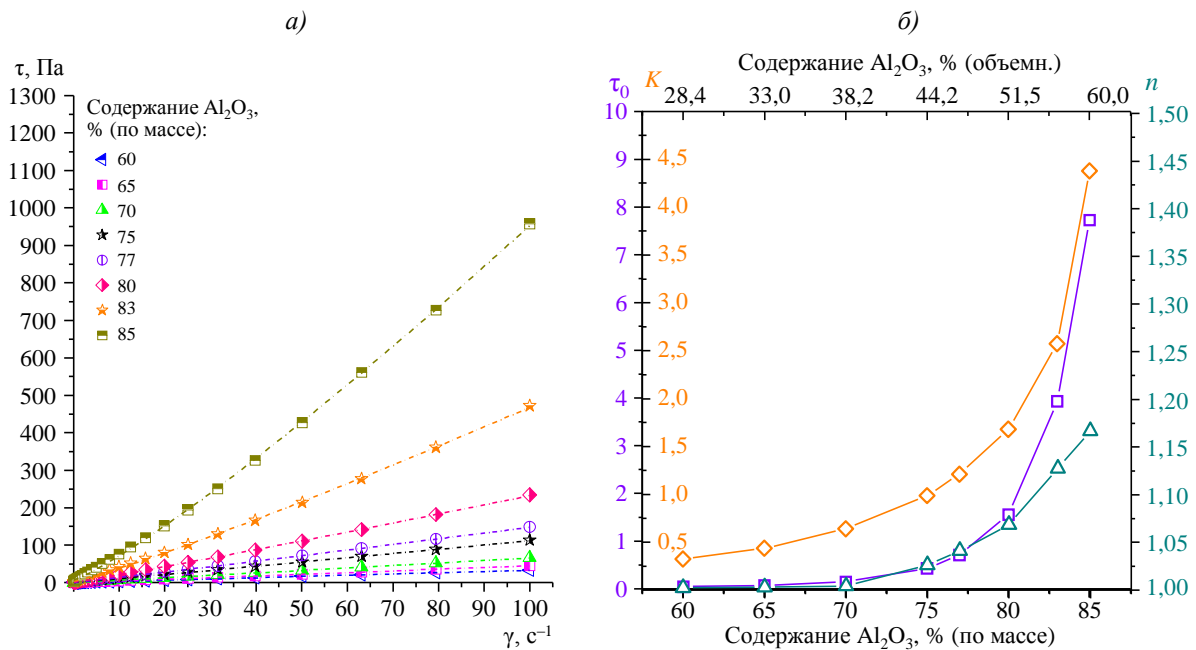


Рис. 9. Зависимости напряжения  $\tau$  от скорости сдвига  $\gamma$  (а, пунктирными линиями показана аппроксимация с использованием модели Гершеля–Балкли) и зависимости реологических параметров модели Гершеля–Балкли от содержания керамических частиц (б) для суспензий, содержащих 3 % (по массе) диспергатора б ( $\tau_0$  – предел текучести;  $K$  – показатель консистенции;  $n$  – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения)

Важно подчеркнуть, что с увеличением объемной доли оксида алюминия также улучшается стабильность керамической суспензии. В состав данного керамического порошка оксида алюминия входят мелкие частицы субмикронного размера и крупные частицы микронного размера. Мелкие частицы стабилизируются за счет взаимодействия с их поверхностью смачивающе-диспергирующей добавки б, обеспечивающей стерическую стабилизацию, что предотвращает процессы флокуляции с последующим осаждением под действием гравитационных сил. Крупные частицы керамического порошка, которые подвержены осаждению под действием гравитационных сил, стабилизируются за счет плотной упаковки мелких и крупных частиц оксида алюминия, сочетание которых препятствует оседанию последних. Обнаружено, что при содержании в составе керамической суспензии  $\geq 80$  % (по массе) частиц оксида алюминия седиментация керамических частиц полностью прекращается.

### *Влияние концентрации смачивающе-диспергирующей добавки на реологическое поведение керамических суспензий*

С целью определения оптимальной концентрации смачивающе-диспергирующей добавки в составе керамической суспензии приготовлены композиции с содержанием 80, 83 и 85 % (по массе) оксида алюминия и с концентрацией диспергатора б в диапазоне от 0,25 до 5,00 % (по массе) от содержания керамического порошка. На рис. 10 представлены зависимости динамической вязкости керамических суспензий от массовой доли диспергатора б в составе композиции.

Для всех керамических суспензий на основе оксида алюминия с содержанием 80, 83 и 85 % (по массе) керамических частиц с увеличением концентрации диспергатора б сначала наблюдается резкое снижение вязкости. При концентрации смачивающе-диспергирующей добавки 2,5 % (по массе) отмечено минимальное значение вязкости. При концентрации смачивающе-диспергирующей добавки  $\geq 3,0$  % (по массе) вязкость композиций увеличивается. Таким образом, оптимальное количество смачивающе-диспергирующей добавки б в составе керамических суспензий с содержанием 80–85 % (по массе) оксида алюминия составляет  $\sim 2,5$  % (по массе), что соответствует композициям с минимальной вязкостью.

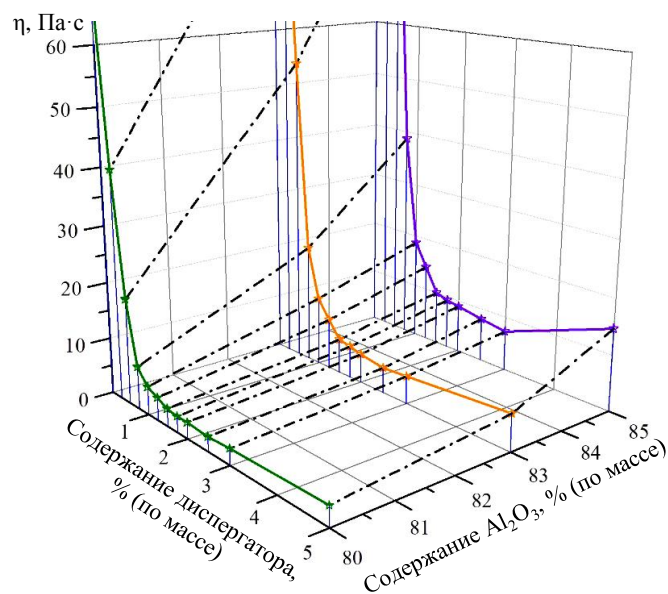


Рис. 10. Зависимости динамической вязкости  $\eta$  керамической суспензии от содержания диспергатора б в составе композиции (при скорости сдвига  $30 \text{ c}^{-1}$  и температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

На рис. 11 показано схематическое изображение процесса адсорбции диспергатора *б* на поверхности частиц оксида алюминия. При концентрации молекул диспергатора, недостаточной для полного образования адсорбционной оболочки на частицах (рис. 11, *а*), формируются коагуляционные структуры и агрегаты в результате действия молекулярных сил сцепления непосредственно между поверхностями этих частиц. При оптимальном количестве диспергатора *б* (рис. 11, *б*) на частицах оксида алюминия образуется защитная адсорбционная оболочка, которая препятствует столкновению и слипанию частиц, что в результате способствует снижению вязкости и предела текучести керамической суспензии. В случае, когда концентрация диспергатора в композиции превысит предел адсорбции, избыточные молекулы диспергатора занимают пространство между частицами, запутываются с уже адсорбированными молекулами и выступают в качестве мостиков между частицами, тем самым вызывая их флокуляцию, которая приводит к увеличению вязкости керамической суспензии.

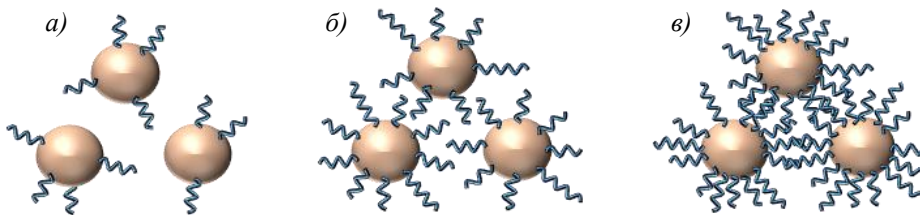


Рис. 11. Схематическое изображение процесса адсорбции на частицах оксида алюминия при недостаточном (*а*), оптимальном (*б*) и избыточном (*в*) количестве диспергатора *б*

На рис. 12 представлен сравнительный график результатов, опубликованных авторами работ [28–37] и полученных в данной работе, для керамических суспензий на основе оксида алюминия. В данной работе удалось получить стабильные керамические суспензии, доля частиц оксида алюминия ( $\geq 51,5$  % (объемн.)) в которых значительно превышала результаты, представленные в других научно-технических литературных источниках, в том же диапазоне вязкости.

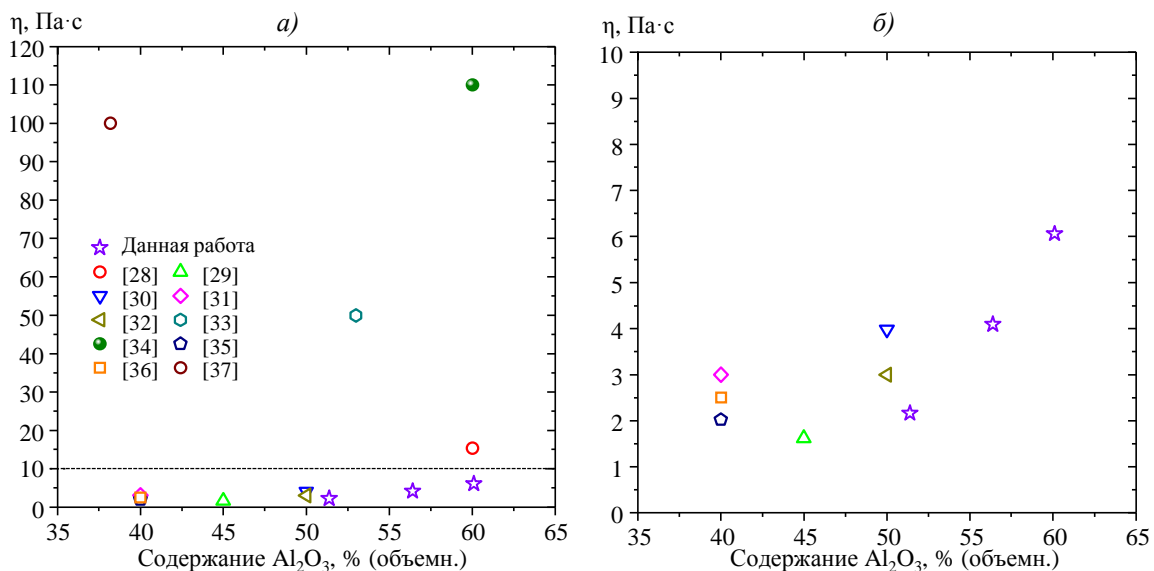


Рис. 12. Зависимости динамической вязкости  $\eta$  керамических суспензий в диапазонах 0–120 (*а*) и 0–10 Па·с (*б*) от концентрации частиц оксида алюминия, полученные в данной работе и опубликованные в работах других авторов

На основе разработанных высоконаполненных фотоотверждаемых керамических суспензий с помощью технологии DLP напечатаны «зеленые» керамические изделия сложной формы (рис. 13). В дальнейших работах будут представлены результаты исследований свойств изделий из алюмооксидной керамики, полученных после стадий выжигания полимерного связующего и спекания керамики.



Рис. 13. Изделия, напечатанные из разработанных высоконаполненных керамических суспензий на основе оксида алюминия по технологии цифровой обработки светом

### Заключения

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны стабильные керамические суспензии на основе оксида алюминия с высоким содержанием частиц (51,5; 55,4 и 60,0 % (объемн.)) и низкой вязкостью (2,16; 4,09 и 6,06 Па·с), которые можно использовать для получения изделий из алюмооксидной керамики с помощью метода DLP.

Исследовано влияние природы и концентрации смачивающе-диспергирующих добавок, а также объемной доли дисперсной фазы на вязкость и реологическое поведение керамических суспензий на основе оксида алюминия. Установлено, что наибольшую седиментационную устойчивость показали керамические суспензии, содержащие в качестве диспергатора алкиламмониевую соль эфира фосфорной кислоты, у которых не наблюдали четкой границы раздела фаз. Показано, что с увеличением объемной доли оксида алюминия повышаются вязкость суспензий и прочность начальной структуры, их реологическое поведение изменяется от ньютоновского к дилатантному.

Работа выполнена в рамках комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы (ККМ)» комплексного научного направления 14. «Высокотемпературные керамические, теплозащитные и керамоподобные материалы».

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории «Полимерные связующие, клеи и специальные жидкости» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – ведущему инженеру Е.В. Куршеву и ведущему научному сотруднику Ю.А. Егорову за помощь в проведении исследований и подготовке статьи.

### Список источников

1. Aza A., Chevalier J., Fantozzi G. et al. Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses // *Biomaterials*. 2002. No. 23 (3). P. 937–945. DOI: 10.1016/s0142-9612(01)00206-x.
2. Толкачева А.С. Технология керамики для материалов электронной промышленности. Часть 1. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 124 с.
3. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

4. Kang J., Song X.G., Hu S.P. et al. Wetting and brazing of alumina by Sn<sub>0,3</sub>Ag<sub>0,7</sub>Cu–Ti alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48 (12). P. 5870–5878. DOI: 10.1007/s11661-017-4371-8.
5. Willmann G. Ceramic femoral heads for total hip arthroplasty // *Advanced Engineering Materials*. 2000. Vol. 2 (3). P. 114–122.
6. Denry I., Kelly J.R. Emerging ceramic-based materials for dentistry // *Journal of Dental Research*. 2014. Vol. 93 (12). P. 1235–1242. DOI: 10.1177/0022034514553627.
7. Wei L., Zhang J., Yu F. A novel fabrication of yttrium-stabilized-zirconia dense electrolyte for solid oxide fuel cells by 3D printing technique // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44 (12). P. 6182–6191. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.071.
8. Fei J., Qiaolei L., Kun Y. et al. Optimisation and application of high solid loading stereolithography 3D printing ceramic cores slurry // *Ceramics International*. 2024. Vol. 50 (2). P. 3574–3583. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.11.107.
9. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Бутузов А.В., Светогоров К.И., Ваганова М.Л., Чайникова А.С. Получение высокоплотной алюмооксидной керамики методом лазерной стереолитографии // *Жидкие кристаллы и «умные» наноматериалы (XI Чистяковские чтения): сб. тез. докл. Всерос. науч. конф. с международным участием*. Иваново: Изд-во Ивановск. гос. ун-та, 2025. С. 40.
10. Bondareva N.S., Buonomo B., Manca O., Sheremet M.A. Heat transfer inside cooling system based on phase change material with alumina nanoparticles // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 144. P. 972–981. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.002.
11. Huang D.-S., Chen T.-C., Tsai L.-T., Lin M.-T. Design of fins with a grooved heat pipe for dissipation of heat from high-powered automotive LED headlights // *Energy Conversion Management*. 2019. Vol. 180. P. 550–558. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.021.
12. Minatto F.D., Milak P., De Noni A. et al. Multilayered ceramic composites – a review // *Advances in Applied Ceramics*. 2015. Vol. 114 (3). P. 127–138. DOI: 10.1179/1743676114Y.0000000215.
13. Leo S., Tallon C., Stone N., Franks G.V. Near-netshaping methods for ceramic elements of (body) armor systems // *Journal of the American Ceramic Society*. 2015. Vol. 97. P. 3013–3033. DOI: 10.1111/jace.13192.
14. Klocke F. Modern approaches for the production of ceramic components // *Journal of the European Ceramic Society*. 1997. Vol. 17. P. 457–465. DOI: 10.1016/S0955-2219(96)00163-X.
15. Wang X., Luo Y. Diameter prediction of removal particles in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser cutting based on vapor-to-melt ratio // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 251. P. 109–117. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.011.
16. Wang J., Zhang J., Feng P. Effects of tool vibration on fiber fracture in rotary ultrasonic machining of C/SiC ceramic matrix composites // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 129. P. 233–242. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.081.
17. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
18. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
19. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Беляченков И.О., Прокофьев В.А. Получение керамических материалов методом стереолитографии // *Труды ВИАМ*. 2023. № 9 (127). С. 79–89. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
20. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Колмогоров А.Ю., Гуров Д.А., Чайникова А.С. Возможность применения технологии послойного наплавления (FDM) для получения керамических изделий // *Труды ВИАМ*. 2024. № 8 (138). С. 64–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
21. Lacelle T., Sampson K.L., Sarvestani H.Y. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: materials, methods, and applications // *APL Materials*. 2023. Vol. 11. P. 1–29. DOI: 10.1063/5.0151661.

22. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects // *Science*. 2015. Vol. 347. P. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
23. Малаев И.А., Пивоваров М.Л. Аддитивные технологии: применение в медицине и фармации // *Вестник фармации*. 2019. № 2 (84). С. 98–107.
24. Бутузов А.В., Семина А.В. Предкерамические полимеры для производства керамических изделий путем фотополимеризации в ванне. Часть 1. Способы получения и свойства // *Труды ВИАМ*. 2025. № 3 (145). С. 70–88. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.
25. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A., Branciforti M.C. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 11906–11921. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.
26. Сарычев И.А., Бутузов А.В., Серкова Е.А., Долгова Е.В. Фотоотверждаемые акрилатные композиции (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 9 (115). С. 68–82. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.
27. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing // *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 117. P. 10212–10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
28. Zhang K., Xie C., Wang G. et al. High solid loading, low photosensitive Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slurry for stereolithography based additive manufacturing // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45 (1). P. 203–208. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.152.
29. Zhang S., Sha N., Zhao Z. Surface modification of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, with dicarboxylic acids for the preparation of UV-curable ceramic suspensions // *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. P. 1607–1616. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.12.013.
30. Wu X., Lian Q., Li D. et al. Influence of boundary masks on dimensions and surface roughness using segmented exposure in ceramic 3D printing // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45 (3). P. 3687–3697. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.11.031.
31. Goswami A., Ankit K., Balashanmugam N. et al. Optimization of rheological properties of photopolymerizable alumina suspensions for ceramic microstereolithography // *Ceramics International*. 2014. Vol. 40 (2). P. 3655–3665. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.09.059.
32. Chartier T., Dupas C., Geffroy P.M. et al. Influence of irradiation parameters on the polymerization of ceramic reactive suspensions for stereolithography // *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37 (15). P. 4431–4436. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.050.
33. Hinczewski C., Corbel S., Chartier T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography // *Journal of the European Ceramic Society*. 1998. Vol. 18. P. 583–590. DOI: 10.1016/S0955-2219(97)00186-6.
34. Chartier T., Chaput C., Doreau F., Loiseau M. Stereolithography of structural complex ceramic parts // *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. P. 3141–3147. DOI: 10.1023/A:1016102210277.
35. Li K.H., Zhao Z. The effect of the surfactants on the formulation of UV-curable SLA alumina suspension // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. P. 4761–4767. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.11.143.
36. Alves P.L., Verza J.R., Luz A.P. Rheological behavior of alumina suspensions for additive manufacturing using digital light processing // *Materials Research*. 2023. Vol. 26 (1). P. 1–6. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2023-0270.
37. Верхошанский Я.Ю., Ткачев Д.А. Разработка и исследование материала для стереолитографической 3D-печати на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Физика. Технологии. Инновации: тез. докл. XI Международной молодежной науч. конф.* Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2024. С. 580–581.
38. Richardson J.F., Zaki W.N. Sedimentation and fluidisation: Part I // *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1954. Vol. 32. P. 35–53. DOI: 10.1016/S0263-8762(97)80006-8.
39. Митюков А.В. Высококонтрированные суспензии с матрицами на основе полимерных композиций для порошкового литья под давлением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 145 с.
40. Liu D.M. Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions:  $\phi_m$  determination and viscosity prediction // *Journal of Materials Science*. 2000. Vol. 35. P. 5503–5507. DOI: 10.1023/A:1004885432221.

## References

1. Aza A., Chevalier J., Fantozzi G. et al. Crack growth resistance of alumina, zirconia and zirconia toughened alumina ceramics for joint prostheses. *Biomaterials*, 2002, no. 23 (3), pp. 937–945. DOI: 10.1016/s0142-9612(01)00206-x.
2. Tolkacheva A.S. *Ceramic Technology for Electronics Materials. Part 1*. Ekaterinburg: Ural Univ. Press, 2019, 124 p.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kang J., Song X.G., Hu S.P. et al. Wetting and brazing of alumina by Sn<sub>0,3</sub>Ag<sub>0,7</sub>Cu–Ti alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48 (12), pp. 5870–5878. DOI: 10.1007/s11661-017-4371-8.
5. Willmann G. Ceramic femoral heads for total hip arthroplasty. *Advanced Engineering Materials*, 2000, vol. 2 (3), pp. 114–122.
6. Denry I., Kelly J.R. Emerging ceramic-based materials for dentistry. *Journal of Dental Research*, 2014, vol. 93 (12), pp. 1235–1242. DOI: 10.1177/0022034514553627.
7. Wei L., Zhang J., Yu F. A novel fabrication of yttrium-stabilized-zirconia dense electrolyte for solid oxide fuel cells by 3D printing technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44 (12), pp. 6182–6191. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.071.
8. Fei J., Qiaolei L., Kun Y. et al. Optimisation and application of high solid loading stereolithography 3D printing ceramic cores slurry. *Ceramics International*, 2024, vol. 50 (2), pp. 3574–3583. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.11.107.
9. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Butuzov A.V., Svetogorov K.I., Vaganova M.L., Chainikova A.S. Production of high-density alumina ceramics by laser stereolithography. *Liquid crystals and «smart» nanomaterials (XI Chistyakov readings)*: collection of papers. All-Rus. sci. conf. with Int. participation. Ivanovo: Publ. house of Ivanovo State Univ., 2025, p. 40.
10. Bondareva N.S., Buonomo B., Manca O., Sheremet M.A. Heat transfer inside cooling system based on phase change material with alumina nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 144, pp. 972–981. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.09.002.
11. Huang D.-S., Chen T.-C., Tsai L.-T., Lin M.-T. Design of fins with a grooved heat pipe for dissipation of heat from high-powered automotive LED headlights. *Energy Conversion Management*, 2019, vol. 180, pp. 550–558. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.021.
12. Minatto F.D., Milak P., De Noni A. et al. Multilayered ceramic composites – a review. *Advances in Applied Ceramics*, 2015, vol. 114 (3), pp. 127–138. DOI: 10.1179/1743676114Y.0000000215.
13. Leo S., Tallon C., Stone N., Franks G.V. Near-netshaping methods for ceramic elements of (body) armor systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, vol. 97, pp. 3013–3033. DOI: 10.1111/jace.13192.
14. Klocke F. Modern approaches for the production of ceramic components. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, vol. 17, pp. 457–465. DOI: 10.1016/S0955-2219(96)00163-X.
15. Wang X., Luo Y. Diameter prediction of removal particles in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser cutting based on vapor-to-melt ratio. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 251, pp. 109–117. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.011.
16. Wang J., Zhang J., Feng P. Effects of tool vibration on fiber fracture in rotary ultrasonic machining of C/SiC ceramic matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 2017, vol. 129, pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.081.
17. Kablov E.N. The Present and Future of Additive Technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
18. Kablov E.N. Additive Technologies – the Dominant Focus of the National Technological Initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
19. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Belyachenkov I.O., Prokofiev V.A. Obtaining of ceramic materials by stereolithography method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), pp. 79–89. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.

20. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Kolmogorov A.Yu., Gurov D.A., Chainikova A.S. Possibility of using layer-by-layer deposition technology (FDM) to produce ceramic products. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), pp. 64–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
21. Lacelle T., Sampson K.L., Sarvestani H.Y. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: materials, methods, and applications. *APL Materials*, 2023, vol. 11, pp. 1–29. DOI: 10.1063/5.0151661.
22. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2015, vol. 347, pp. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
23. Malaev I.A., Pivovarov M.L. Additive technologies: application in medicine and pharmacy. *Vestnik farmatsii*, 2019, no. 2 (84), pp. 98–107.
24. Butuzov A.V., Semina A.V. Preceramic polymers for the production of ceramic products by vat photopolymerization. Part 1. Methods of production and properties. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), pp. 70–88. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.
25. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A., Branciforti M.C. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 11906–11921. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.
26. Sarychev I.A., Butuzov A.V., Serkova E.A., Dolgova E.V. Photocurable acrylate compositions (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), pp. 68–82. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.
27. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J. et al. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing. *Chemical Reviews*, 2017, vol. 117, pp. 10212–10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
28. Zhang K., Xie C., Wang G. et al. High solid loading, low photosensitive Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slurry for stereolithography based additive manufacturing. *Ceramics International*, 2019, vol. 45 (1), pp. 203–208. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.152.
29. Zhang S., Sha N., Zhao Z. Surface modification of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, with dicarboxylic acids for the preparation of UV-curable ceramic suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, pp. 1607–1616. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.12.013.
30. Wu X., Lian Q., Li D. et al. Influence of boundary masks on dimensions and surface roughness using segmented exposure in ceramic 3D printing. *Ceramics International*, 2019, vol. 45 (3), pp. 3687–3697. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.11.031.
31. Goswami A., Ankit K., Balashanmugam N. et al. Optimization of rheological properties of photopolymerizable alumina suspensions for ceramic microstereolithography. *Ceramics International*, 2014, vol. 40 (2), pp. 3655–3665. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.09.059.
32. Chartier T., Dupas C., Geffroy P.M. et al. Influence of irradiation parameters on the polymerization of ceramic reactive suspensions for stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37 (15), pp. 4431–4436. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.05.050.
33. Hinczewski C., Corbel S., Chartier T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, vol. 18, pp. 583–590. DOI: 10.1016/S0955-2219(97)00186-6.
34. Chartier T., Chaput C., Doreau F., Loiseau M. Stereolithography of structural complex ceramic parts. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37, pp. 3141–3147. DOI: 10.1023/A:1016102210277.
35. Li K.H., Zhao Z. The effect of the surfactants on the formulation of UV-curable SLA alumina suspension. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, pp. 4761–4767. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.11.143.
36. Alves P.L., Verza J.R., Luz A.P. Rheological behavior of alumina suspensions for additive manufacturing using digital light processing. *Materials Research*, 2023, vol. 26 (1), pp. 1–6. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2023-0270.

37. Verkhoshansky Ya.Yu., Tkachev D.A. Development and study of material for stereolithographic 3D printing based on  $Al_2O_3$ . *Physics. Technologies. Innovations*: abstract of report. XI Int. Youth Scientific Conf. Ekaterinburg: Ural Federal Univ. Publ. House, 2024, pp. 580–581.
38. Richardson J.F., Zaki W.N. Sedimentation and fluidisation: Part I. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1954, vol. 32, pp. 35–53. DOI: 10.1016/S0263-8762(97)80006-8.
39. Mityukov A.V. *Highly concentrated suspensions with matrices based on polymer compositions for powder injection molding*: thesis, Cand. Sc. (Tech.), Moscow, 2022, 145 p.
40. Liu D.M. Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions:  $\phi_m$  determination and viscosity prediction. *Journal of Materials Science*, 2000, vol. 35, pp. 5503–5507. DOI: 10.1023/A:1004885432221.

#### Информация об авторах

**Бутузов Александр Владимирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Лебедева Юлия Евгеньевна**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Семина Анна Владимировна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Серкова Евгения Алексеевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Лонский Станислав Леонардович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Alexander V. Butuzov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Yulia E. Lebedeva**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anna V. Semina**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgenia A. Serkova**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Stanislav L. Lonskii**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.01.2026.  
The article was submitted 11.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.01.2026.