

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-55-74

АДДИТИВНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СВЕТОМ

А.В. Бутузов¹, Ю.Е. Лебедева¹, Е.А. Серкова¹, А.В. Семина¹,
Е.В. Долгова¹, М.В. Турченко¹, Е.В. Куршев¹

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

Аннотация. Рассмотрены возможности применения метода цифровой обработки светом (DLP) для получения керамических изделий из алюмооксидной керамики. Разработана стабильная высоконаполненная фотоотверждаемая керамическая суспензия на основе оксида алюминия. Показана возможность изготовления методом DLP сложнопрофильных изделий из алюмооксидной керамики со свойствами на уровне лучших аналогов конструкционного назначения, получаемых традиционными методами (плотность 3,5–3,8 г/см³, прочность при изгибе 142–223 МПа, коэффициент интенсивности напряжений 5,9 МПа√м), а также изделий из пористой керамики.

Ключевые слова: оксид алюминия, фотоотверждаемые керамические суспензии, аддитивные технологии, цифровая обработка светом, плотная керамика, пористая керамика

Для цитирования: Бутузов А.В., Лебедева Ю.Е., Серкова Е.А., Семина А.В., Долгова Е.В., Турченко М.В., Куршев Е.В. Аддитивное получение алюмооксидной керамики методом цифровой обработки светом // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 55–74. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-55-74.

Scientific article

ADDITIVE PRODUCTION OF ALUMINA CERAMIC BY DIGITAL LIGHT PROCESSING

A.V. Butuzov¹, Yu.E. Lebedeva¹, E.A. Serkova¹, A.V. Semina¹,
E.V. Dolgova¹, M.V. Turchenko¹, E.V. Kurshev¹

¹Federal 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 discusses the possibilities of using the DLP method to produce ceramic products from alumina ceramic. A stable highly filled photo-curable ceramic slurry based on aluminum oxide has been developed, which makes it possible to obtain complex ceramic products made of alumina by the DLP method with properties at the level of the best structural analogues obtained by traditional methods: density 3,5–3,8 g/cm³, bending strength 142–223 MPa, stress intensity coefficient pressure is 5,9 MPa√m, as well as products made of porous ceramics.

Keywords: aluminum oxide, photo-curable ceramic slurry, additive technologies, digital light processing, dense ceramic, porous ceramic

For citation: Butuzov A.V., Lebedeva Yu.E., Serkova E.A., Semina A.V., Dolgova E.V., Turchenko M.V., Kurshev E.V. Additive production of alumina ceramic by digital light processing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 55–74. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-55-74.

Введение

Современное материаловедение сталкивается с постоянной необходимостью создания сложных керамических изделий, обладающих высокими физико-механическими характеристиками и отвечающих требованиям разных отраслей промышленности, в том числе авиационной [1–3]. Традиционные методы производства керамических материалов, такие как горячее прессование, холодное изостатическое прессование, экструзия, литье под давлением и др., хоть и хорошо себя зарекомендовали, однако требуют сложной механической обработки. Керамическим материалам свойственны высокая твердость и хрупкость, поэтому изготовление сложнопрофильных изделий становится чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом, требующим использования специального оборудования и высококвалифицированного персонала [4].

Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование технологий аддитивного производства [5–8]. Данные технологии позволяют создавать керамические изделия с высоким уровнем физико-механических свойств практически любой формы и сложности, минуя необходимость в сложной и длительной последующей механической обработке. Преимущества аддитивных технологий открывают совершенно новые возможности для инженеров-конструкторов, предоставляя им свободу в создании керамических изделий с невероятно сложной геометрической конфигурацией не только во внешнем, но и во внутреннем исполнении. Одним из наиболее важных преимуществ аддитивного производства керамических изделий является максимально приближенный к единице коэффициент использования материала. В отличие от традиционных методов, где значительная часть сырья теряется в процессе производства, аддитивные технологии минимизируют отходы и являются экономически выгодными, особенно при работе с дорогостоящими и редкими материалами. Процесс производства керамического изделия также существенно ускоряется, поскольку исчезает необходимость в создании и использовании дорогостоящих литейных форм и форм для прессования, которые требуют значительных временных и материальных затрат. При этом быстрая и несложная корректировка проекта изделия, изменение его размеров и формы легко реализуются в рамках аддитивных технологий [9–11].

Следует отметить еще одну важнейшую составляющую аддитивного производства керамических материалов – выбор исходного керамического порошка. Его гранулометрический состав, физико-химические свойства, морфология напрямую влияют на качество конечного керамического изделия, определяя его прочность, теплопроводность, шероховатость и многие другие свойства. Даже незначительные отклонения состава керамического порошка могут привести к существенным изменениям характеристик готовой детали. Керамические изделия, созданные с помощью аддитивных технологий, находят применение в передовых областях науки и техники, где предъявляют высочайшие требования к характеристикам материалов. Авиастроение и биомедицина являются яркими примерами данного подхода. Например, аддитивные технологии используются для создания высокоточных керамических стержней для литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей или керамических имплантов со сложной геометрической формой, точно соответствующих анатомическим особенностям пациента [12–15].

Среди современных технологий аддитивного производства метод цифровой обработки светом (Digital Light Processing – DLP) выделяется как один из наиболее передовых и перспективных подходов, обеспечивающих исключительную точность и широкий спектр возможностей для изготовления керамических материалов [16–18]. Комплексный процесс производства керамических изделий с помощью технологии DLP включает несколько последовательных этапов, каждый из которых критически важен

(рис. 1): 3D-печать полимерно-керамического изделия, постобработка полимерно-керамического изделия, термическое удаление отвержденного полимерного связующего, спекание керамики. В основе метода DLP лежит принцип послойного построения трехмерной модели путем селективного отверждения фотоотверждаемой керамической суспензии под действием ультрафиолетового (УФ) источника света.

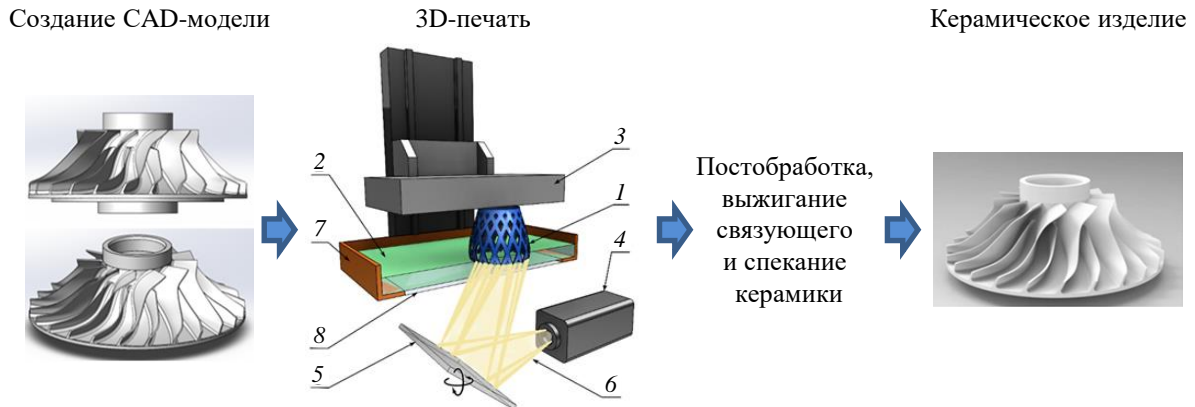


Рис. 1. Схема полного цикла аддитивного производства изделия из керамики по технологии цифровой обработки светом: 1 – печатаемое полимерно-керамическое изделие; 2 – фотоотверждаемая керамическая суспензия; 3 – платформа построения; 4 – проектор; 5 – цифровое мультиспектральное устройство; 6 – световой поток; 7 – ванна; 8 – фторэтиленпропиленовая пленка

Высоконаполненная фотоотверждаемая керамическая суспензия для технологии DLP представляет собой тщательно подобранную композицию, состоящую из фотоотверждаемого полимерного связующего и керамического порошка (Al_2O_3 , BaTiO_3 , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, AlN , ZrO_2 , Y_2O_3 и др.) с частицами определенной фракции и формы. Объемная доля керамического порошка в составе суспензии имеет критически важное значение, влияет на стабильность процесса печати и определяет качество конечного керамического изделия [19–24]. Так, объемная доля керамического порошка напрямую влияет на реологические характеристики изготавливаемой фотоотверждаемой керамической суспензии, такие как вязкость, предел текучести, псевдопластичные, дилатантные, тиксотропные и реопексные свойства. Очень высокая концентрация частиц керамического порошка может привести к слишком вязкой для технологии DLP суспензии, а очень низкая – к чрезмерной усадке, дефектам и низкой плотности керамического изделия.

Технология DLP отличается высоким качеством и точностью печати, что является одним из ее ключевых преимуществ. Однако, несмотря на многочисленные достоинства данной технологии, имеются и определенные ограничения. Одним из таких существенных недостатков является то, что керамические порошки должны обладать определенными значениями светопропускания, светоотражения и светорассеяния [23].

Фотоотверждаемое полимерное связующее, выступающее в качестве дисперсионной среды, отвечает за процесс послойного отверждения керамической суспензии. В качестве активных ингредиентов такого связующего выступают фотополимеры и фотоинициаторы. Фотополимеры – общее название группы высокомолекулярных соединений, обладающих способностью к фотополимеризации, т. е. способных отверждаться – менять физическое состояние, переходя из жидкости в твердое тело под действием светового облучения. В качестве таких фотополимеров используются мономеры и/или олигомеры с ненасыщенными углерод-углеродными ($-\text{C}=\text{C}-$) связями в молекуле (чаще винильные и акрилатные/метакрилатные), а также гетероциклические соединения с напряженными циклами (чаще эпоксидными). Отверждение фотополимеров происходит без выделения побочных продуктов, при этом существенно меняются прочностные

и стойкостные характеристики материала. Международная практика показала, что для получения фотоотверждаемых высоконаполненных керамических суспензий необходимо использовать в качестве фотополимеров соединения акриловых и метакриловых мономеров и олигомеров [16–35]. Данный выбор обусловлен тем, что они обладают рядом преимуществ перед эпоксидными и полиэфирными соединениями, такими как высокая реакционная способность, низкая вязкость, хорошая механическая прочность, а также невысокое содержание коксового остатка после процесса пиролиза [26–28]. При выборе иницирующих фотополимеризацию добавок важным аспектом является природа выбранных фотополимеров и длина волны источника светового излучения. Для отверждения фотополимерной основы, состоящей из акрилатных мономеров и олигомеров, обычно используют фотоинициаторы I типа по классификации Норриша [36], предназначенные для полимеризации по радикальному механизму. В зависимости от источника излучения из фотоинициаторов I типа выбирают только те высокоэффективные УФ-отверждающие агенты, которые обладают наибольшей абсорбционной способностью при заданной технологическим оборудованием длине волны [16, 17, 26–28]. С целью повышения седиментационной стабильности и получения наиболее высоконаполненных керамических суспензий в фотоотверждаемое полимерное связующее, как правило, добавляют смачивающе-диспергирующие добавки, обладающие стерическим эффектом [26].

В современном мире материалы на основе оксида алюминия являются одними из наиболее перспективных и распространенных для изготовления сложнопрофильных изделий методом DLP [37–40]. Из них получают изделия вакуумплотной керамики, изоляторы, подложки для микроэлектроники, тонкостенные сложнопрофильные керамические стержни для литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей и др. Вследствие комплекса высоких физико-механических, теплоизоляционных и электрических свойств, хорошей термостойкости, отличной коррозионной стойкости и биосовместимости [41, 42] корундовая керамика приобрела широкое распространение в самых разных областях промышленности, особенно в аэрокосмической, электротехнической, биоинженерной, стоматологической и др. [43–46].

В НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ» разработаны высоконаполненная фотоотверждаемая керамическая суспензия на основе оксида алюминия и технология получения из нее алюмооксидной керамики методом DLP.

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов для получения высоконаполненной фотоотверждаемой керамической суспензии использовали порошок оксида алюминия и фотоотверждаемое полимерное связующее марки ВС-82(Н) на основе (мет)акрилатных мономеров и олигомеров, фотоинициаторов и смачивающе-диспергирующих добавок. Микроструктура и дифрактограмма исходного порошка Al_2O_3 показаны на рис. 2 и 3. Фотоотверждаемые керамические суспензии изготавливали путем смешивания связующего марки ВС-82(Н) и оксида алюминия в орбитально-планетарном смесителе. Содержание дисперсной фазы в составах суспензий варьировали от 28,4 до 60,0 % (объемн.).

Реологические исследования фотоотверждаемых керамических суспензий проводили на реометре в рабочем узле «плоскость–плоскость» в соответствии с ГОСТ 25276–82 при температуре 25 ± 1 °С. 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 составлял 1 мм.

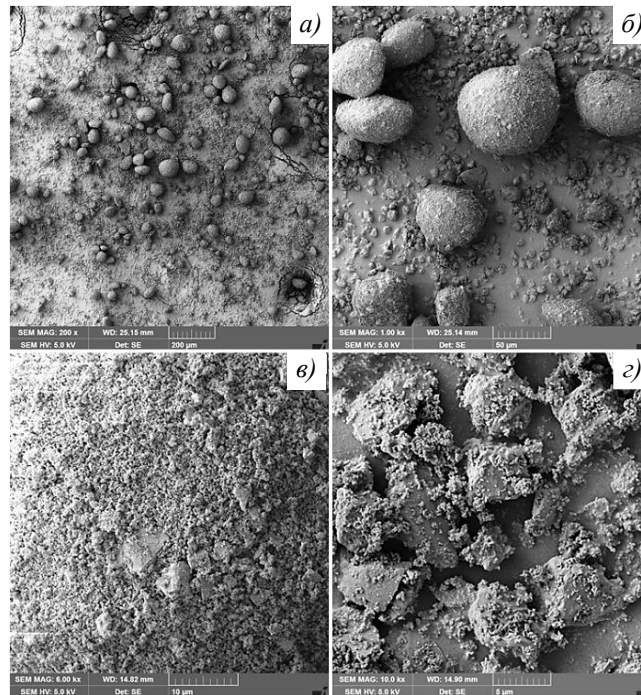


Рис. 2. Структура исходного порошка оксида алюминия при увеличениях $\times 200$ (а), $\times 1000$ (б), $\times 6000$ (в) и $\times 10000$ (г)

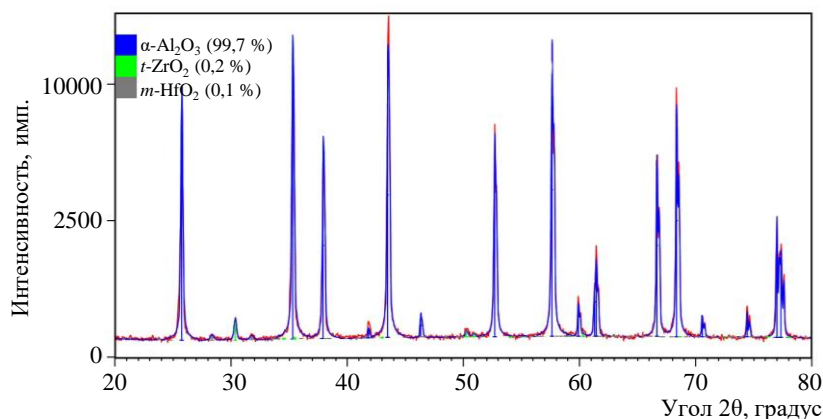


Рис. 3. Дифрактограмма исходного порошка оксида алюминия в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении

Массовую долю керамического порошка в керамической суспензии определяли в соответствии с ГОСТ 27184–86 после прокаливания в электрической печи при температуре 600 ± 10 °С с выдержкой 3 ч.

Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 200$ до $\times 10000$ (для порошка оксида алюминия) и от $\times 500$ до $\times 20000$ (для образцов деталей).

Термогравиметрический анализ проводили с использованием синхронного термического анализатора в атмосфере воздуха (100 мл/мин) с обычной калибровкой (In, Sn, Bi, Zn, CsCl) и скоростью нагревания 10 К/мин в диапазоне 20–700 °С.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 2409–2014. Прочность при трехточечном изгибе определяли на образцах размером $4 \times 50 \times 12$ мм. Твердость и трещиностойкость определяли на микротвердомере при нагрузке 5 кг. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) определяли на dilatометре в интервале температур 20–1600 °С.

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

Результаты и обсуждение

На основе порошка оксида алюминия и фотоотверждаемого полимерного связующего изготовлены образцы фотоотверждаемых керамических суспензий с различной долей частиц (от 28,4 до 60,0 % (объемн.)) и определены их реологические свойства. Фотоотверждаемые керамические суспензии исследовали на ротационном вискозиметре в интервале скоростей сдвига 0–100 с⁻¹ при температуре 25 °С. Полученные результаты представлены на рис. 4.

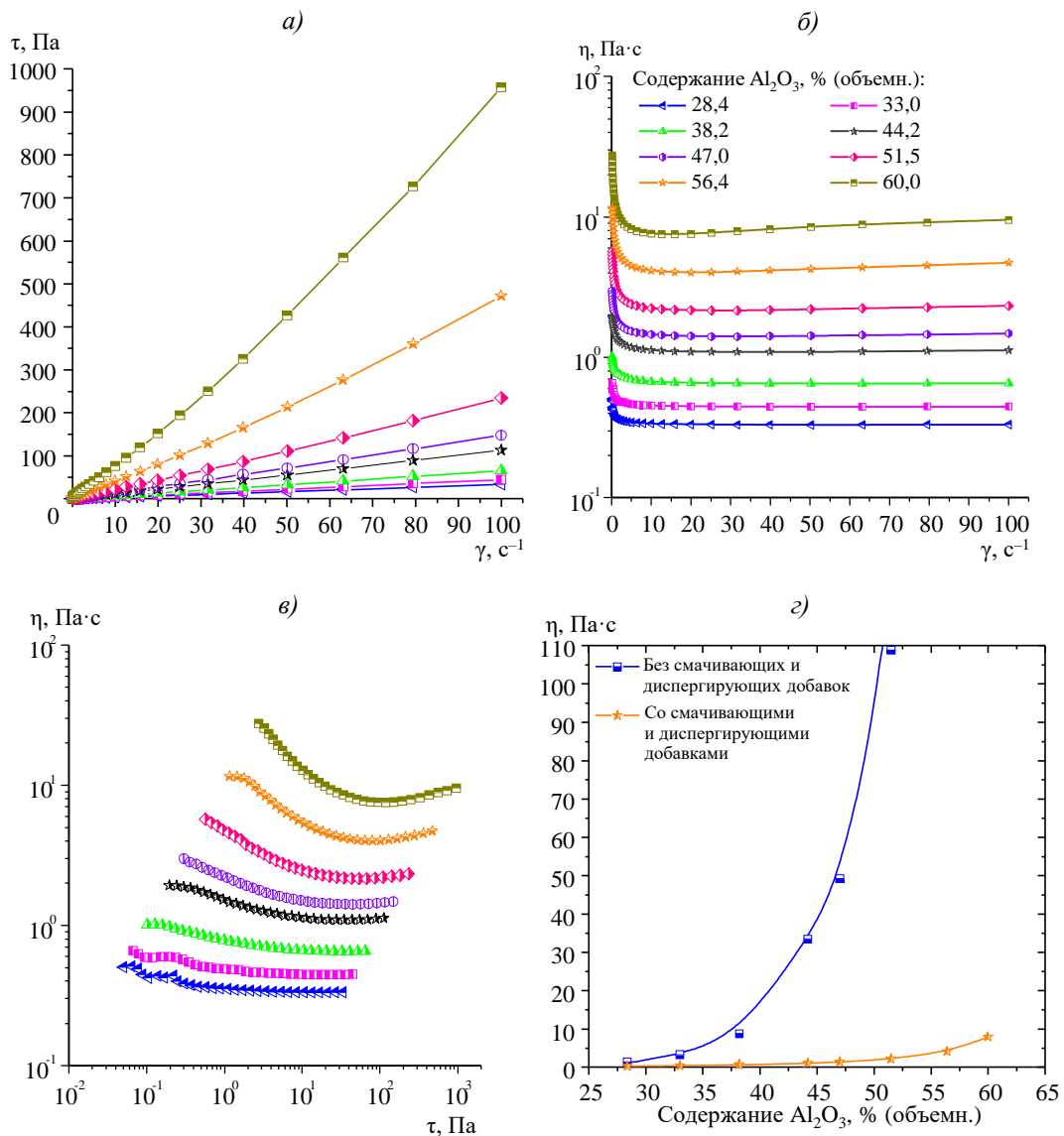


Рис. 4. Зависимости напряжения τ от скорости сдвига γ (а) и динамической вязкости η от скорости сдвига γ (б), напряжения сдвига τ (в) и объемной доли частиц оксида алюминия при скорости сдвига 30 с⁻¹ (г) для фотоотверждаемых керамических суспензий

Фотоотверждаемое связующее, выступающее в качестве дисперсионной среды, проявляет ньютоновский характер течения при сдвиге, при этом высоконаполненные

керамические суспензии на его основе обладают неньютоновским поведением из-за частиц оксида алюминия, выступающих в качестве дисперсной фазы. Из-за многофазности, характерной для высоконаполненных керамических суспензий, на их реологическое поведение влияют свойства дисперсионной среды, дисперсной фазы и взаимодействия между ними. Полученные фотоотверждаемые керамические суспензии обладают реологическим поведением с характерным «разжижением» при сдвиге (рис. 4, *а–в*). 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 воздействии сдвига.

Для наглядного представления влияния смачивающе-диспергирующих добавок, входящих в состав фотоотверждаемого полимерного связующего, по зависимостям вязкости суспензий (при скорости сдвига 30 с^{-1}) от содержания керамических частиц построен график, представленный на рис. 4, *г*. Для керамических суспензий, не содержащих смачивающе-диспергирующих добавок, 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. При этом можно отметить, что подобранная система смачивающе-диспергирующих добавок в составе фотоотверждаемого связующего позволила получить фотоотверждаемые керамические суспензии с высокой седиментационной стабильностью и содержанием частиц Al_2O_3 на 22 % (объемн.) больше при том же значении вязкости, чем без ее использования.

Таким образом, для дальнейшего исследования выбрана фотоотверждаемая керамическая суспензия с низкой вязкостью, содержащая 51,5 % (объемн.) частиц Al_2O_3 , что позволило использовать ее на DLP-принтере, предназначенном для печати фотополимерными смолами. Внешний вид фотоотверждаемой керамической суспензии с содержанием 51,5 % (объемн.) частиц Al_2O_3 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Высоконаполненная фотоотверждаемая керамическая суспензия на основе оксида алюминия (51,5 % (объемн.))

С целью снижения вязкости фотоотверждаемой керамической суспензии проведены исследования по определению влияния температуры на реологическое поведение. На основании проведенного реологического анализа фотоотверждаемой керамической суспензии, содержащей 51,5 % (объемн.) Al_2O_3 , построены графики зависимостей вязкости и течения (рис. 6, *а–в*). Реологическое поведение полученных суспензий хорошо описывается с помощью модели Гершеля–Балкли:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига; τ_0 – предел текучести; K – показатель консистенции; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; n – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения.

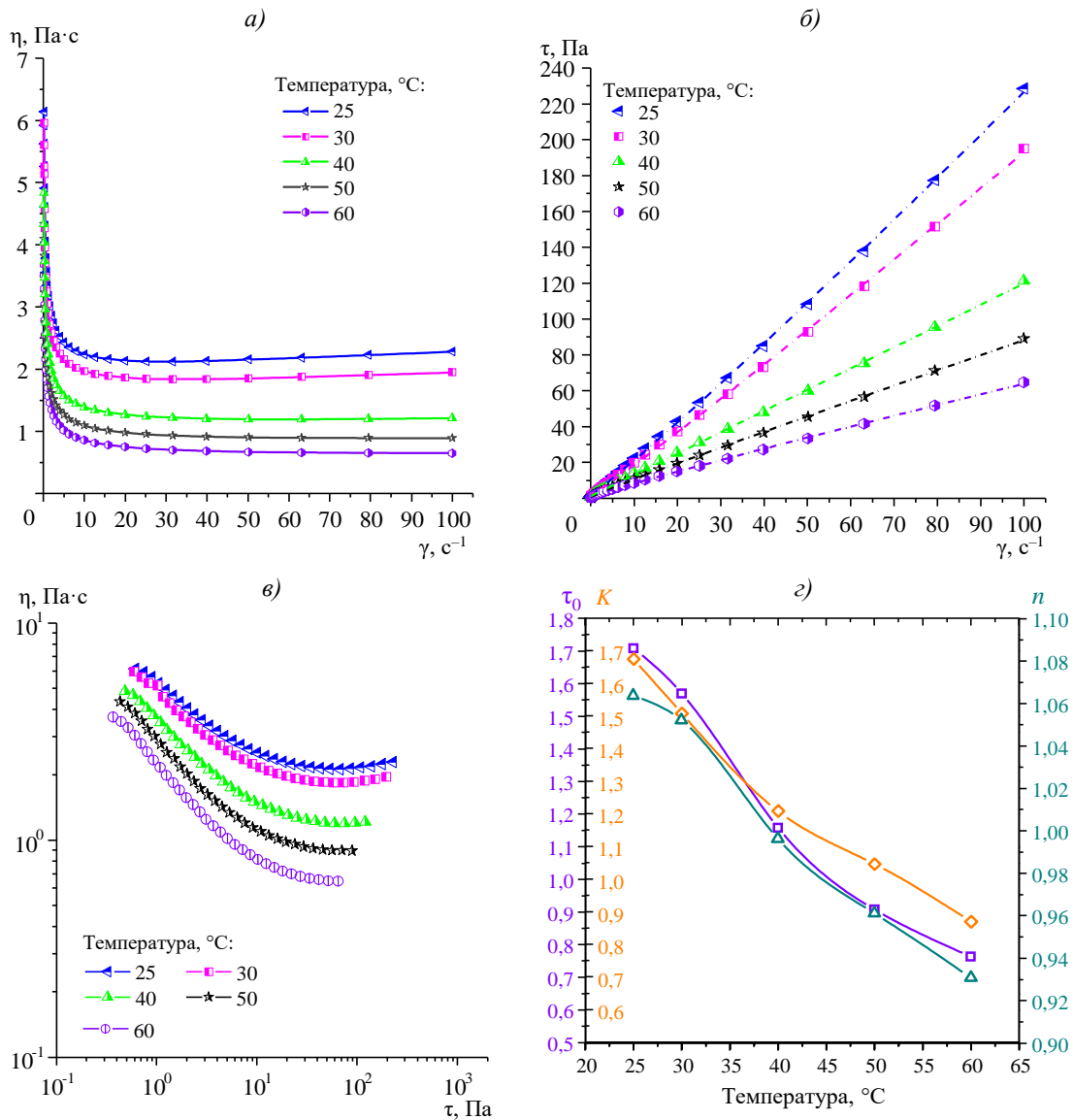


Рис. 6. Влияние температуры на реологическое поведение фотоотверждаемой керамической суспензии, содержащей 51,5 % (объемн.) Al₂O₃: а – зависимости динамической вязкости η от скорости сдвига $\dot{\gamma}$; б – зависимости напряжения τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (пунктирными линиями показана аппроксимация с использованием модели Гершеля–Балкли); в – зависимости динамической вязкости η от напряжения сдвига τ ; г – зависимости параметров модели Гершеля–Балкли от температуры (τ_0 – предел текучести, K – показатель консистенции, n – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения)

Высокое значение коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,9995$) свидетельствует о хорошей сходимости экспериментальных данных с расчетными (табл. 1). На основе полученных значений параметров модели построены графики их зависимости от температуры (рис. 6, г). С увеличением температуры происходит уменьшение значений показателей K , n , τ_0 . Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением температуры

не только уменьшается вязкость фотоотверждаемой керамической суспензии, но также изменяется ее реологическое поведение от дилатантного до вязкопластичного течения (в диапазоне скоростей сдвига от 0 до 100 с^{-1}), а также снижается прочность начальной структуры.

Таблица 1

Влияние температуры на параметры модели Гершеля–Балкли фотоотверждаемой керамической суспензии

Параметры	Значения параметров при температуре, °С				
	25	30	40	50	60
τ_0	1,7085	1,5699	1,1576	0,9079	0,7632
K	1,6742	1,5070	1,2072	1,0448	0,8684
n	1,0637	1,0521	0,9962	0,9612	0,9308
R^2	0,9995	0,9995	0,9995	0,9997	0,9997

Примечание. τ_0 – предел текучести; K – показатель консистенции; n – индекс течения, который показывает степень отклонения от ньютоновского поведения; R^2 – коэффициент детерминации.

Для выбора параметров режима печати полимерно-керамической детали осуществляли следующие действия. На стекле в области воздействия источника УФ-излучения DLP-принтера размещали прозрачную фторэтиленпропиленовую пленку и наносили на нее ~1 мл керамической суспензии для достижения толщины слоя, превышающей максимально возможную глубину отверждения (700–900 мкм). Затем проводили отверждение под действием УФ-излучения с длиной волны 405 нм в течение 3–60 с (рис. 7, а). Полученный в результате воздействия слой полимеризованного материала очищали от остатков непрореагировавшей жидкой суспензии, после чего проводили замер толщины полученных пленок с помощью микрометра типа МКЦ с шагом дискретности 0,001 мм (рис. 7, б). Параметры печати выбирали, анализируя зависимость глубины полимеризации керамической суспензии от дозы излучения. График полученной зависимости строили в полулогарифмических координатах (рис. 8) и аппроксимировали уравнением, которое Якобс вывел из уравнения Бера–Ламберта:

$$C_D = D_p \ln(E/E_c), \quad (2)$$

где C_D – глубина фотополимеризации; D_p – фоточувствительность керамической суспензии; E – энергия воздействия УФ-источника излучения; E_c – критическая (минимальная) величина энергии воздействия лазера УФ-источника излучения, необходимая для фотополимеризации экспериментального образца фотоотверждаемой керамической суспензии.

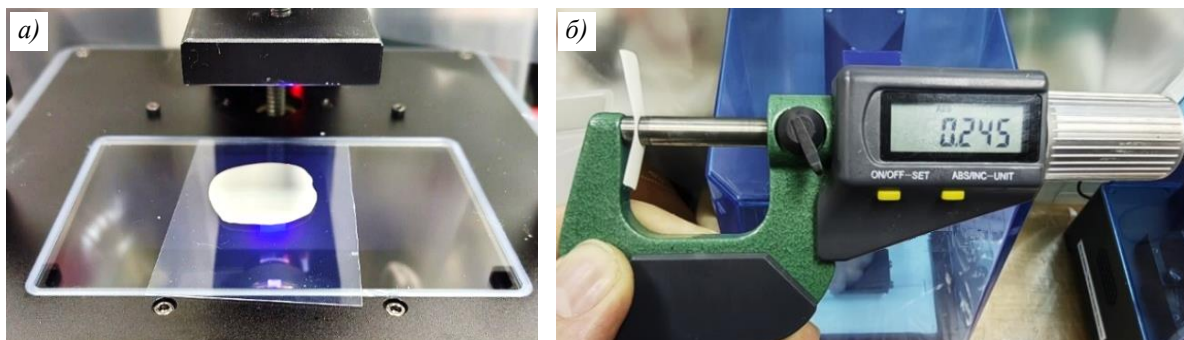


Рис. 7. Процесс определения глубины отверждения C_D : а – отверждение керамической суспензии; б – измерение толщины отвержденного слоя с помощью микрометра типа МКЦ

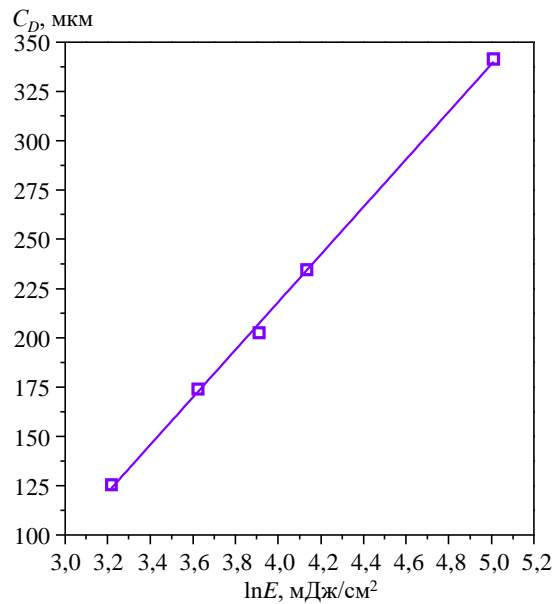


Рис. 8. Зависимость изменения глубины отверждения монослоя C_D фотоотверждаемой керамической суспензии от интенсивности светового потока E

Построение графика зависимости C_D от E в полулогарифмических координатах позволяет, исходя из уравнения прямой, аппроксимирующей отмеченные на графике точки, вычислить значение D_p , используя которое, согласно формуле (2), можно также определить значение критической энергии E_c . Экспериментально полученная зависимость глубины фотополимеризации керамической суспензии от дозы излучения имеет высокое согласование с уравнением (2), поскольку коэффициент детерминации $R^2 = 0,9989$, и может быть представлена в виде уравнения

$$C_D = 120,66 \ln E - 264,62 = 120,66 \ln(E/8,963). \quad (3)$$

На основании полученных параметров фотополимеризации керамической суспензии 3D-печать полимерно-керамических образцов осуществляли с толщиной монослоя 50 мкм при интенсивности светового потока 37,5 мДж/см².

Печать изделий по технологии DLP из фотоотверждаемой керамической суспензии проводили при длине волны УФ-излучения 405 нм следующим образом. Подвижную рабочую платформу аппарата погружали в ванну с подогретой до температуры 40 °С жидкой фотоотверждаемой керамической суспензией на расстояние от дна, равное толщине наращиваемого слоя изделия (50 мкм). Затем DLP-проектор проецировал изображение целого сечения САD-модели до момента полного отверждения первого слоя полимерно-керамического изделия, после чего рабочую платформу поднимали вверх, отрывая от дна ванны напечатанный слой. Далее платформу снова погружали в ванну на толщину слоя, где поверхность пленки самотеком заполнялась незаполимеризованной жидкой фотоотверждаемой керамической суспензией, и вновь проецировалось изображение нового слоя цифровой модели. Облучение приводило к фотополимеризации и отверждению жидкой композиции лишь на тех участках, на которых ее засвечивал световой поток. Данные этапы повторяли до тех пор, пока изделие не было полностью сформировано. Проектор DLP проецировал изображение на рабочую платформу через цифровое мультизеркальное устройство, представляющее собой систему подвижных жестких алюминиевых зеркал с очень высоким коэффициентом отражения. Каждое из зеркал можно переключать в одно из двух положений: в первом – зеркало

отражает падающее на него световое излучение, перенаправляя свет на линзу и затем на слой жидкой фотоотверждаемой керамической суспензии; во втором – отклоняет световое излучение в сторону от линзы (на светопоглотитель). В результате слаженного взаимодействия всей матрицы на слой жидкой композиции попадает световое изображение заданной конфигурации, вызывая его селективное отверждение.

На рис. 9 приведены микрофотографии поверхностей шлифа и скола образца полимерно-керамического изделия, полученного путем 3D-печати из керамической суспензии на основе оксида алюминия по технологии DLP. Слои печати от 3D-принтера в материале слабо выражены, толщина слоев составляет от 46 до 50 мкм. Структура матрицы материала многофазная, состоит из полимерной части с размерами агрегатов дисперсных частиц от 140 до 720 нм, а также из порошкообразных частиц оксида алюминия неправильной формы, размеры которых не превышают 9 мкм. При изготовлении шлифа и скола в материале происходят многочисленные выкрашивания порошкообразных частиц неправильной формы.

Свойства разработанной фотоотверждаемой керамической суспензии в сравнении со свойствами импортного аналога представлены в табл. 2.

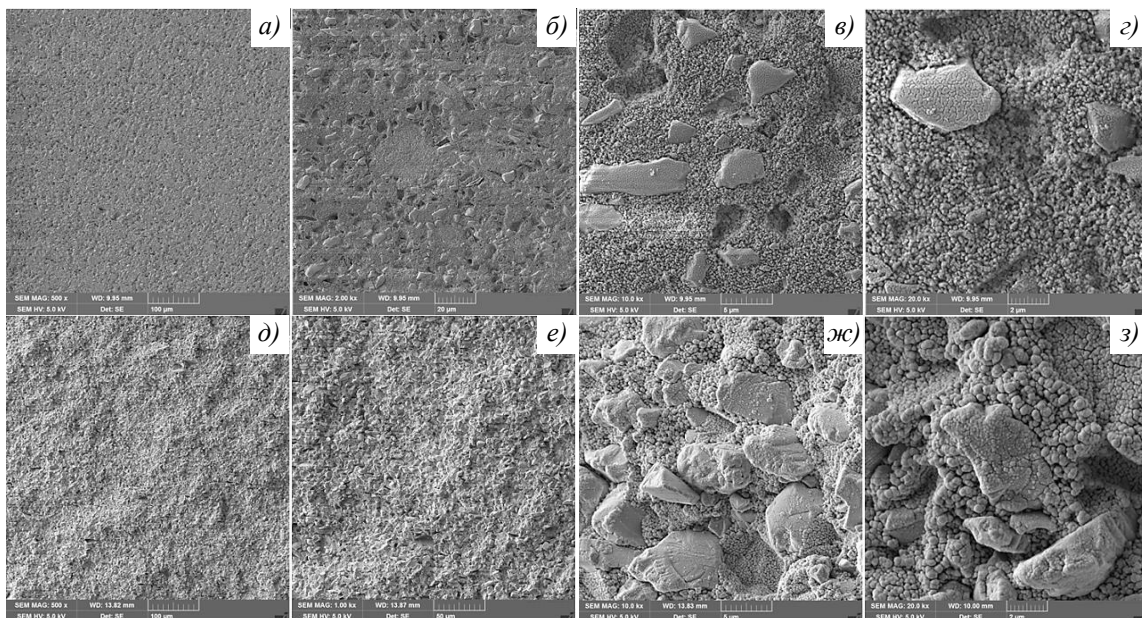


Рис. 9. Микроструктуры шлифа (а–г) и скола (д–з) образца полимерно-керамической детали, синтезированной из керамической суспензии с содержанием 51,5 % (объемн.) оксида алюминия по технологии цифровой обработки светом, при увеличениях $\times 500$ (а, д), $\times 2000$ (б, е), $\times 10000$ (в, ж) и $\times 20000$ (г, з)

Таблица 2

Сравнение свойств фотоотверждаемых керамических суспензий на основе Al_2O_3 отечественного и импортного производства

Показатели	Значения показателей для керамической суспензии	
	разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ	марки KoMitsuLite Alumina (фирма Tethon 3D, США)
Длина волны для отверждения, нм	405	405
Вязкость, Па·с	2,11–2,21 (при 25 °С)	26,96–46,15 (при 20 °С)
Содержание Al_2O_3 , % (по массе)	80,06–80,11	85,0

После 3D-печати методом DLP проводили низкотемпературную вакуумную постобработку с последующим выжиганием связующего. Режим термического удаления отвержденного полимерного связующего подбирали после проведения термогравиметрического анализа, который показал, что процесс пиролиза полимера происходит в интервале температур от 100 до 500 °С (рис. 10). Потеря массы начинается с температуры ~140 °С и при ~190°С составляет 1,5 %, после 300 °С скорость разложения фотоотвержденного полимерного связующего резко увеличивается и достигает 15 % (по массе). При нагреве образцов до температуры >500 °С происходит полное разложение связующего, остаточное количество составляет 81,8 % (по массе).

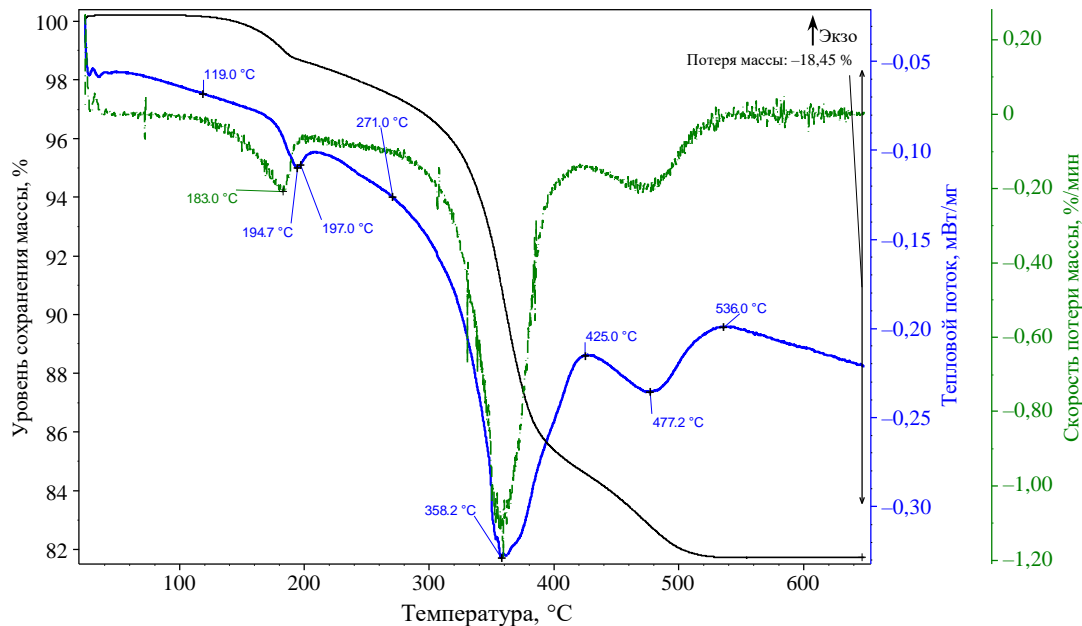


Рис. 10. Результаты синхронного термического анализа (термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия) полимерно-керамических изделий

Процесс спекания образцов из алюмооксидной керамики проводили при температуре 1500–1750 °С в воздушной среде. Усадку полученной керамики определяли путем сопоставления размеров САD-модели и полученного образца после полного цикла аддитивного производства. При изготовлении керамических изделий методом DLP уменьшение размеров образцов происходит из-за полимерной усадки в ходе печати, а также последующих процессов выжигания связующего и спекания керамики. Полученные результаты позволили определить коэффициенты поправки на усадку для плотной керамики на основе оксида алюминия: 14,04; 15,63 и 18,54 % по ширине, длине и высоте соответственно.

Изготовленная фотоотверждаемая высоконаполненная керамическая суспензия на основе оксида алюминия позволила обеспечить формирование равномерной мелкокристаллической структуры и высокие значения физико-механических характеристик. На рис. 11 показана микроструктура шлифа и скола полученной плотной алюмооксидной керамики. В образцах спеченных керамических деталей явных очертаний слоев от послойного построения при 3D-печати не выявлено, при этом в объеме образца обнаружены многочисленные пустоты неправильной формы, что хорошо видно на шлифе. Размер зерен не превышает 7 мкм. Плотность керамического материала из оксида алюминия составила 3,5–3,8 г/см³.

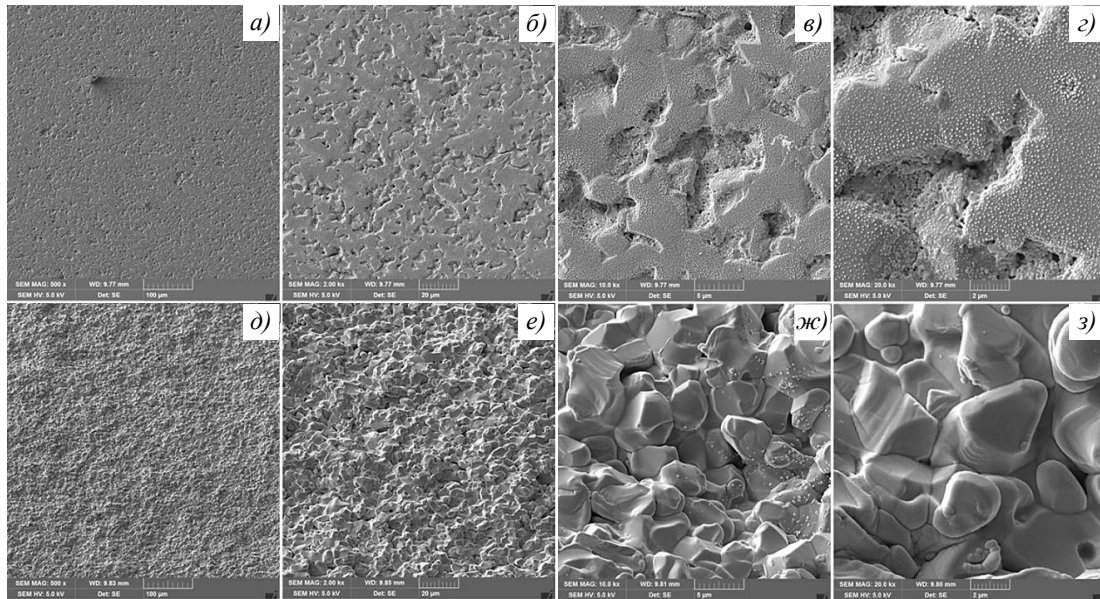


Рис. 11. Микроструктуры шлифа (а–г) и скола (д–з) образца спеченной алюмооксидной керамики, полученной по технологии цифровой обработки светом, при увеличениях $\times 500$ (а, д), $\times 2000$ (б, е), $\times 10000$ (в, ж) и $\times 20000$ (г, з)

Результаты исследования физико-механических и теплофизических характеристик (плотность, прочность при изгибе, ТКЛР, трещиностойкость) изготовленной алюмооксидной керамики в сравнении со свойствами импортного аналога приведены в табл. 3. Характеристики керамики на основе оксида алюминия делают ее перспективной для изготовления различных изделий сложной формы (например, втулки для малоразмерного газотурбинного двигателя, тигли для термоанализа, подложки для микроэлектроники и др.). Характеристики полученной керамики находятся на уровне показателей зарубежных аналогов.

Из разработанной фотоотверждаемой керамической суспензии также можно получать пористые изделия из оксида алюминия, в том числе керамические стержни для литья охлаждаемых лопаток газотурбинного двигателя по выплавляемым моделям. Структура пористой керамики из оксида алюминия с открытой пористостью $>35\%$ представлена на рис. 12. Результаты исследования физико-механических характеристик (плотность, прочность при изгибе, открытая пористость) полученной пористой керамики на основе оксида алюминия приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Свойства алюмооксидной керамики,
полученной по технологии цифровой обработки светом**

Свойства	Значения свойств для алюмооксидной керамики из керамической суспензии		
	разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ		марки KoMitsuLite Alumina (фирма Tethon 3D, США)
	пористая керамика		плотная керамика
Плотность, г/см ³	2,45–2,51	3,5–3,8	3,82
Прочность при изгибе при 20 °С, МПа	6–15	142–223	123,99
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ (при нагреве до 1600 °С)	–	8,47	–
Трещиностойкость $K_{Ic}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	–	5,9	–
Открытая пористость, %	36,05–37,34	–	–

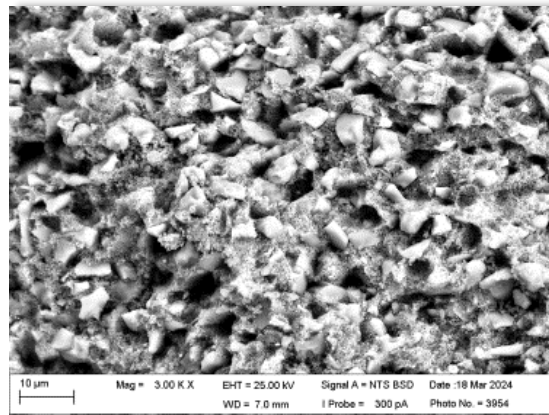


Рис. 12. Микроструктура пористой оксидной керамики

На основе разработанной высоконаполненной фотоотверждаемой керамической суспензии в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ получены изделия сложной формы по DLP-технологии (рис. 13).

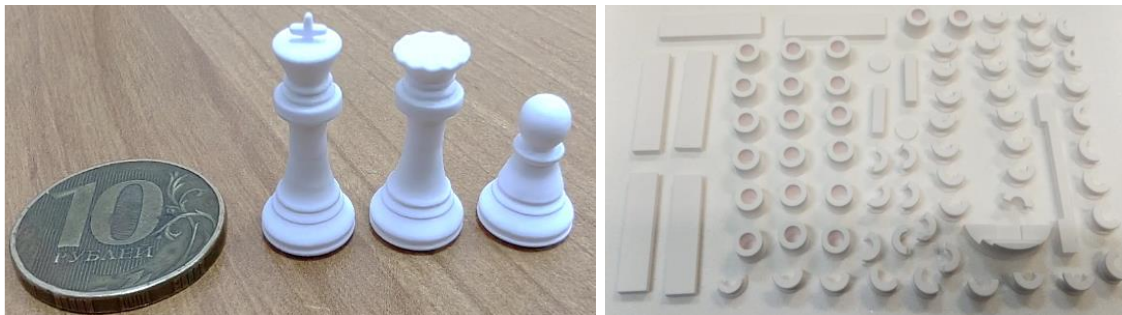


Рис. 13. Примеры изделий из оксидной керамики, полученных методом цифровой обработки светом из высоконаполненной фотоотверждаемой керамической суспензии, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Заключения

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана высоконаполненная фотоотверждаемая керамическая суспензия на основе оксида алюминия. Получены изделия из плотной и пористой оксидной керамики методом DLP. Разработанный состав обеспечивает высокую степень наполнения – более 80 % (по массе), или 51,4 % (объемн.), что позволяет получать методом DLP высокоплотные сложнопрофильные изделия со свойствами на уровне лучших аналогов конструкционного назначения, получаемых традиционными методами. Разработанная технология позволяет изготавливать изделия из оксида алюминия любой сложности, в том числе для применения в авиационной промышленности.

Определены режимы удаления связующего и спекания керамики, обеспечивающие равномерную высокоплотную мелкокристаллическую структуру и высокие значения физико-механических свойств на уровне импортных аналогов (плотность 3,5–3,8 г/см³, прочность при изгибе 142–223 МПа, ТКЛР $8,47 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, коэффициент интенсивности напряжений $5,9 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$).

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ организован участок полного цикла керамического аддитивного производства, позволяющего получать сложнопрофильные изделия из оксидной керамики методом DLP из высоконаполненных фотоотверждаемых керамических суспензий на основе оксида алюминия.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ С.Л. Лонскому за помощь в проведении микроструктурных исследований и анализа результатов.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
2. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
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. Elsayed H., Carraro F., Agnoli S. et al. Direct ink writing of silica-carbon-calcite composite scaffolds from a silicone resin and fillers // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. P. 5200–5207. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.049.
5. 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: 27.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
6. Бутузов А.В., Лебедева Ю.Е., Серкова Е.А. Фотоотверждаемое полимерное предкерамическое связующее для получения оксидной керамики методом цифровой обработки светом (DLP) // Тез. Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Жидкие кристаллы и «умные» наноматериалы» (XI Чистяковские чтения) (г. Иваново, 20–21 мая 2025 г.). Иваново: Ивановск. гос. ун-т, 2025. С. 61.
7. Бутузов А.В., Лебедева Ю.Е., Серкова Е.А., Семина А.В., Турченко М.В. Аддитивное получение образцов алюмооксидной керамики из высоконаполненной керамической суспензии технологией DLP // Тез. Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Жидкие кристаллы и «умные» наноматериалы» (XI Чистяковские чтения) (г. Иваново, 20–21 мая 2025 г.). Иваново: Ивановск. гос. ун-т, 2025. С. 62.
8. 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: 27.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
9. Глазунов В.С., Черепанова М.В. Применение аддитивных технологий в производстве керамических изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Химическая технология и биотехнология*. 2018. № 4. С. 174–187. DOI: 10.15593/2224-9400/2018.4.14.
10. Рогова А.Н., Чувикина М.С., Беляков А.В. и др. Перспективность использования аддитивных методов в технологии производства керамических материалов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. Т. 34. № 5 (228). С. 83–85.
11. Черепанова М.В., Сквородников П.В., Хазеев А.А. Применение аддитивных технологий в производстве керамических изделий сложных форм // *Научный альманах*. 2018. № 10-2 (48). С. 73–76. DOI: 10.17117/na.2018.10.02.073.
12. Flume E., Coppola B., Montanaro L., Palmero P. Vat-photopolymerization of ceramic materials: exploring current applications in advanced multidisciplinary fields // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1–32. DOI: 10.3389/fmats.2023.1242480.
13. Li X., Chen Y. Vat-photopolymerization-based ceramic manufacturing // *ASM Handbook*. ASM International, 2020. Vol. 24: Additive Manufacturing Processes. P. 81–96. DOI: 10.31399/asm.hb.v24.a0006578.

14. Сухарев Д.А., Шибанов К.С. Аддитивные технологии в производстве керамических изделий и летательных аппаратов // Творчество молодых – родному региону: сб. материалов X Региональной межвузовской науч.-практ. конф. (г. Выкса, 25 апреля 2023 г.). Казань: Бук, 2023. С. 361–371.
15. Малаев И.А., Пивоваров М.Л. Аддитивные технологии: применение в медицине и фармации // Вестник фармации. 2019. № 2 (84). С. 98–107.
16. Rasaki S.A., Xiong D., Xiong S. et al. Photopolymerization-based additive manufacturing of ceramics: A systematic review // Journal of Advanced Ceramics. 2021. Vol. 10. No. 3. P. 442–471. DOI: 10.1007/s40145-021-0468-z.
17. Zakeri S., Vippola M., Levanen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 35. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101177.
18. Shuai X., Zeng Y., Li P., Chen J. Fabrication of fine and complex lattice structure Al₂O₃ ceramic by digital light processing 3D printing technology // Journal of Materials Science. 2020. Vol. 55. P. 6771–6782. DOI: 10.1007/s10853-020-04503-y.
19. Chen Q., Zou B., Lai Q. et al. A study on biosafety of HAP ceramic prepared by SLA-3D printing technology directly // Journal of the Mechanical Behavior Biomedical Materials. 2019. Vol. 98. P. 327–335. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.031.
20. Licciulli A., Corcione C.E., Greco A. et al. Laser stereolithography of ZrO₂ toughened Al₂O₃ // Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. P. 1581–1589. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.024.
21. Bae C.J., Ramachandran A., Chung K., Park S. Ceramic stereolithography additive manufacturing for 3D complex ceramic structures // Journal of the Korean Ceramic Society. 2017. Vol. 54. P. 470–477. DOI: 10.4191/KCERS.2017.54.6.12.
22. Chinelatto A.S.A., Chinelatto A.L., Ojaimi C.L. et al. Effect of sintering curves on the microstructure of alumina–zirconia nanocomposites // Ceramics International. 2014. Vol. 40 (9). P. 14669–14676. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.06.055.
23. Griffith M.L., Halloran J.W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography // Journal of the American Ceramic Society. 2005. Vol. 79. P. 2601–2608. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb09022.x.
24. Zhang K., Xie C., Wang G. et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al₂O₃ slurry for stereolithography based additive manufacturing // Ceramics International. 2019. Vol. 45. P. 203–208. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.152.
25. Ding G., He R., Zhang K. et al. Stereolithography-based additive manufacturing of gray-colored SiC ceramic green body // Journal of the American Ceramic Society. 2019. Vol. 102. P. 1–12. DOI: 10.1111/JACE.16648.
26. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A. 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.
27. 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: 27.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.
28. 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: 27.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.
29. Photopolymer development resin base for use with three-dimensional printer: pat. 11126088 B1 US; appl. 23.04.18; publ. 21.09.21.
30. Фотоотверждаемая смесь для изготовления керамических изделий методом стереолитографии с высокотемпературной постобработкой: пат. 2794673 С1 Рос. Федерация; заявл. 20.05.22; опубл. 24.04.23.
31. Method for the manufacture, by stereolithography, of green pieces of ceramic or metal material by photo-thermal route: pat. 2021/0024422 A1 US; appl. 22.07.20; publ. 28.01.21.

32. Способ получения керамического образца на основе β -трикальцийфосфата с использованием метода стереолитографии для восстановления костной ткани: пат. 2729761 С1 Рос. Федерация; заявл. 29.08.19; опубл. 12.08.20.
33. Композиция на основе стабилизированного диоксида циркония для 3D-печати методом стереолитографии: пат. 2723427 С1 Рос. Федерация; заявл. 26.12.18; опубл. 11.06.20.
34. Способ изготовления стереолитографией сырых заготовок деталей из керамического или металлического материала фототермическим путем: пат. 2739093 С1 Рос. Федерация; заявл. 22.07.19; опубл. 21.12.20.
35. Liu W., Li M., Nie J. et al. Synergy of solid loading and printability of ceramic paste for optimized properties of alumina via stereolithography-based 3D printing // *Journal of Materials Research*. 2020. Vol. 9. P. 11476–11483.
36. Green W.A. *Industrial Photoinitiators: A Technical Guide*. Boca Raton: CRC Press, 2010. 302 p.
37. Хрустов В.Р. Разработка и исследование керамик на основе нанопорошков оксидов алюминия, циркония и церия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2010. 25 с.
38. Ayzov A.M. Aluminum oxide and alumina ceramics (review). Part 1. Properties of Al_2O_3 and commercial production of dispersed Al_2O_3 // *Refractories and industrial ceramics*. 2019. Vol. 60. P. 24–32. DOI: 10.17073/1683-4518-2019-1-16-23.
39. Richards G. Aluminum oxide ceramics // *Concise encyclopedia of advanced ceramic materials*. Pergamon Press, 1991. P. 16–20. DOI: 10.1016/b978-0-08-034720-2/50014-9.
40. Lukin E.S., Makarov N.A., Dovonova I.V. et al. New ceramic materials based on aluminum oxide // *Refractories and industrial ceramics*. 2001. Vol. 42. No. 7. P. 261–268. DOI: 10.1023/A:1012758727396.
41. 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.
42. Толкачева А.С. Технология керамики для материалов электронной промышленности. Часть 1. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 124 с.
43. Kang J., Song X.G., Hu S.P. et al. Wetting and brazing of alumina by $Sn_{0.3}Ag_{0.7}Cu-Ti$ alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48 (12). P. 5870–5878. DOI: 10.1007/s11661-017-4371-8.
44. Willmann G. Ceramic femoral heads for total hip arthroplasty // *Advanced Engineering Materials*. 2000. Vol. 2 (3). P. 114–122.
45. 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.
46. 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.

References

1. Kablov E.N. The Present and Future of Additive Technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
2. Kablov E.N. Additive Technologies – the Dominant Focus of the National Technological Initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
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 tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Elsayed H., Carraro F., Agnoli S. et al. Direct ink writing of silica-carbon-calcite composite scaffolds from a silicone resin and fillers. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, pp. 5200–5207. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.049.
5. 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: October 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.

6. Butuzov A.V., Lebedeva Yu.E., Serkova E.A. Photocurable polymer pre-ceramic binder for producing oxide ceramics by digital light processing (DLP). *Abstracts of the All-Rus. sc. conf. with int. participation «Liquid crystals and «smart» nanomaterials» (XI Chistyakov readings)*. Ivanovo: Ivanovo State Univ., 2025, p. 61.
7. Butuzov A.V., Lebedeva Yu.E., Serkova E.A., Semina A.V., Turchenko M.V. Additive production of alumina ceramic samples from a highly filled ceramic suspension using DLP technology. *Abstracts of the All-Rus. sc. conf. with int. participation «Liquid crystals and «smart» nanomaterials» (XI Chistyakov readings)*. Ivanovo: Ivanovo State Univ., 2025, p. 62.
8. 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 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
9. Glazunov V.S., Cherepanova M.V. Application of additive technologies in the production of ceramic products. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Ser.: Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2018, no. 4, pp. 174–187. DOI: 10.15593/2224-9400/2018.4.14.
10. Rogova A.N., Chuvikina M.S., Belyakov A.V. et al. Prospects of using additive methods in the production technology of ceramic materials. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2020, vol. 34, no. 5 (228), pp. 83–85.
11. Cherepanova M.V., Skovorodnikov P.V., Khazeev A.A. Application of additive technologies in the production of ceramic products of complex shapes. *Nauchnyy almanakh*, 2018, no. 10-2 (48), p. 73–76. DOI: 10.17117/na.2018.10.02.073.
12. Flume E., Coppola B., Montanaro L., Palmero P. Vat-photopolymerization of ceramic materials: exploring current applications in advanced multidisciplinary fields. *Frontiers in Materials*, 2023, vol. 10, pp. 1–32. DOI: 10.3389/fmats.2023.1242480.
13. Li X., Chen Y. Vat-photopolymerization-based ceramic manufacturing. *ASM Handbook*. ASM International, 2020, vol. 24: Additive Manufacturing Processes, pp. 81–96. DOI: 10.31399/asm.hb.v24.a0006578.
14. Sukharev D.A., Shibanov K.S. Additive technologies in the production of ceramic products and aircraft. *Creativity of the young – to their native region: collection of materials of the 10th Regional Interuniversity Sc. and Pract. Conf.* Kazan: Buk, 2023, pp. 361–371.
15. Malaev I.A., Pivovarov M.L. Additive technologies: application in medicine and pharmacy. *Vestnik farmatsii*, 2019, no. 2 (84), pp. 98–107.
16. Rasaki S.A., Xiong D., Xiong S. et al. Photopolymerization-based additive manufacturing of ceramics: A systematic review. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 442–471. DOI: 10.1007/s40145-021-0468-z.
17. Zakeri S., Vippola M., Levanen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101177.
18. Shuai X., Zeng Y., Li P., Chen J. Fabrication of fine and complex lattice structure Al₂O₃ ceramic by digital light processing 3D printing technology. *Journal of Materials Science*, 2020, vol. 55, pp. 6771–6782. DOI: 10.1007/s10853-020-04503-y.
19. Chen Q., Zou B., Lai Q. et al. A study on biosafety of HAP ceramic prepared by SLA-3D printing technology directly. *Journal of the Mechanical Behavior Biomedical Materials*, 2019, vol. 98, pp. 327–335. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.031.
20. Licciulli A., Corcione C.E., Greco A. et al. Laser stereolithography of ZrO₂ toughened Al₂O₃. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, pp. 1581–1589. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.024.
21. Bae C.J., Ramachandran A., Chung K., Park S. Ceramic stereolithography additive manufacturing for 3D complex ceramic structures. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2017, vol. 54, pp. 470–477. DOI: 10.4191/KCERS.2017.54.6.12.

22. Chinelatto A.S.A., Chinelatto A.L., Ojaimi C.L. et al. Effect of sintering curves on the microstructure of alumina–zirconia nanocomposites. *Ceramics International*, 2014, vol. 40 (9), pp. 14669–14676. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.06.055.
23. Griffith M.L., Halloran J.W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, vol. 79, pp. 2601–2608. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb09022.x.
24. Zhang K., Xie C., Wang G. et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al₂O₃ slurry for stereolithography based additive manufacturing. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, pp. 203–208. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.152.
25. Ding G., He R., Zhang K. et al. Stereolithography-based additive manufacturing of gray-colored SiC ceramic green body. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, vol. 102, pp. 1–12. DOI: 10.1111/JACE.16648.
26. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A. 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.
27. 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: October 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-68-82.
28. 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: October 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.
29. *Photopolymer development resin base for use with three-dimensional printer*: pat. 11126088 B1 US; appl. 23.04.18; publ. 21.09.21.
30. *Photocurable mixture for the production of ceramic products using stereolithography with high-temperature post-processing*: pat. 2794673 C1 Rus. Federation; appl. 20.05.22; publ. 24.04.23.
31. *Method for the manufacture, by stereolithography, of green pieces of ceramic or metal material by photo-thermal route*: pat. 2021/0024422 A1 US; appl. 22.07.20; publ. 28.01.21.
32. *A method for producing a ceramic sample based on β-tricalcium phosphate using stereolithography for bone tissue restoration*: pat. 2729761 C1 Rus. Federation; appl. 29.08.19; publ. 12.08.20.
33. *A composition based on stabilized zirconium dioxide for 3D printing by stereolithography*: pat. 2723427 C1 Rus. Federation; appl. 26.12.18; publ. 11.06.20.
34. *A method for producing green blanks of parts from ceramic or metallic material by stereolithography using photothermal means*: pat. 2739093 C1 Rus. Federation; appl. 22.07.19; publ. 21.12.20.
35. Liu W., Li M., Nie J. et al. Synergy of solid loading and printability of ceramic paste for optimized properties of alumina via stereolithography-based 3D printing. *Journal of Materials Research*, 2020, vol. 9, pp. 11476–11483.
36. Green W.A. *Industrial Photoinitiators: A Technical Guide*. Boca Raton: CRC Press, 2010, 302 p.
37. Khrustov V.R. *Development and study of ceramics based on nanopowders of aluminum, zirconium and cerium oxides*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Ekaterinburg, 2010, 25 p.
38. Abyzov A.M. Aluminum oxide and alumina ceramics (review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and commercial production of dispersed Al₂O₃. *Refractories and industrial ceramics*, 2019, vol. 60, pp. 24–32. DOI: 10.17073/1683-4518-2019-1-16-23.
39. Richards G. Aluminum oxide ceramics. *Concise encyclopedia of advanced ceramic materials*. Pergamon Press, 1991, pp. 16–20. DOI: 10.1016/b978-0-08-034720-2/50014-9.
40. Lukin E.S., Makarov N.A., Dovonova I.V. et al. New ceramic materials based on aluminum oxide. *Refractories and industrial ceramics*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 261–268. DOI: 10.1023/A:1012758727396.
41. 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.

42. Tolkacheva A.S. *Ceramic technology for materials of the electronics industry. Part 1.* Ekaterinburg: Ural Univ. Publ. House, 2019, 124 p
43. Kang J., Song X.G., Hu S.P. et al. Wetting and brazing of alumina by Sn_{0,3}Ag_{0,7}Cu–Ti alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, vol. 48 (12), pp. 5870–5878. DOI: 10.1007/s11661-017-4371-8.
44. Willmann G. Ceramic femoral heads for total hip arthroplasty. *Advanced Engineering Materials*, 2000, vol. 2 (3), pp. 114–122.
45. 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.
46. Wei L., Zhang J., Yu F. A novel fabrication of yttria-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.

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

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

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

Долгова Елена Владимировна, заместитель начальника лаборатории по науке, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Турченко Максим Витальевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, 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

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

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

Elena V. Dolgova, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim V. Turchenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny V. Kurshev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.12.2025.
The article was submitted 19.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.12.2025.