

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-197-207

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

М.В. Турченко¹, Ю.Е. Лебедева¹, А.В. Бутузов¹,
А.С. Чайникова¹, М.В. Гамазина¹, К.И. Светогоров¹

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 лазерной стереолитографии для получения изделий из керамики на основе оксида циркония. Разработана высоконаполненная (до 81 % (по массе)) фотоотверждаемая керамическая паста на основе оксида циркония, позволяющая получать сложные керамические изделия методом лазерной стереолитографии. Физико-механические и теплофизические характеристики керамики, полученной из пасты на основе оксида циркония методом лазерной стереолитографии, сопоставимы с показателями керамики, изготовленной традиционными методами.

Ключевые слова: 3D-печать, лазерная стереолитография, оксид циркония, аддитивные технологии, керамические пасты, плотная керамика

Для цитирования: Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Бутузов А.В., Чайникова А.С., Гамазина М.В., Светогоров К.И. Получение керамики на основе оксида циркония методом стереолитографии // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 197–207. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-197-207.

Scientific article

PRODUCTION OF ZIRCONIUM OXIDE-BASED CERAMICS BY STEREOLITHOGRAPHY

M.V. Turchenko¹, Yu.E. Lebedeva¹, A.V. Butuzov¹,
A.S. Chaynikova¹, M.V. Gamazina¹, K.I. Svetogorov¹

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 potential of laser stereolithography for producing zirconium oxide-based ceramics is considered. A highly filled (83 % by weight) photocurable zirconium oxide-based ceramic paste has been developed, enabling the production of complex ceramic products using laser stereolithography (SLA). The physicomechanical and thermophysical properties of the ceramics produced from the zirconium oxide-based paste by SLA are comparable to those of ceramics produced by traditional methods.

Keywords: 3D printing, laser stereolithography, zirconium oxide, additive manufacturing, ceramic pastes, dense ceramics

For citation: Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Butuzov A.V., Chaynikova A.S., Gamazina M.V., Svetogorov K.I. Production of zirconium oxide-based ceramics by stereolithography. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 197–207. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-197-207.

Введение

Получение сложных изделий из керамики является критически важной задачей для высокотехнологичных отраслей промышленности (двигателестроение, ракетно-космическая техника и др.), требующих высокой термо- и износостойкости, химической инертности и прочности материала. Традиционные методы получения керамических изделий (горячее прессование, холодное изостатическое прессование, искровое плазменное спекание, шликерное литье и др.) требуют изготовления сложной технологической оснастки и обязательной механической обработки керамической заготовки, что приводит к существенному удорожанию и усложнению технологического процесса. Помимо этого, механическая обработка оказывает негативное влияние на изделие в целом, создавая микротрещины на поверхности, которые в процессе эксплуатации могут привести к его разрушению [1–6]. Решением данной проблемы служит применение таких инновационных методов получения керамических изделий, как аддитивные технологии (АТ).

В настоящее время интерес к керамическому аддитивному производству значительно усилился. Так, по данным научно-технического портала ScieneDirect, за последние 10 лет количество научно-исследовательских публикаций, связанных с керамическим аддитивным производством, увеличилось в несколько раз (рис. 1). Активный интерес к АТ обусловлен в первую очередь возможностью получения сложнопрофильных керамических изделий различного назначения с физико-механическими характеристиками, сопоставимыми с показателями изделий, изготовленных традиционными методами.

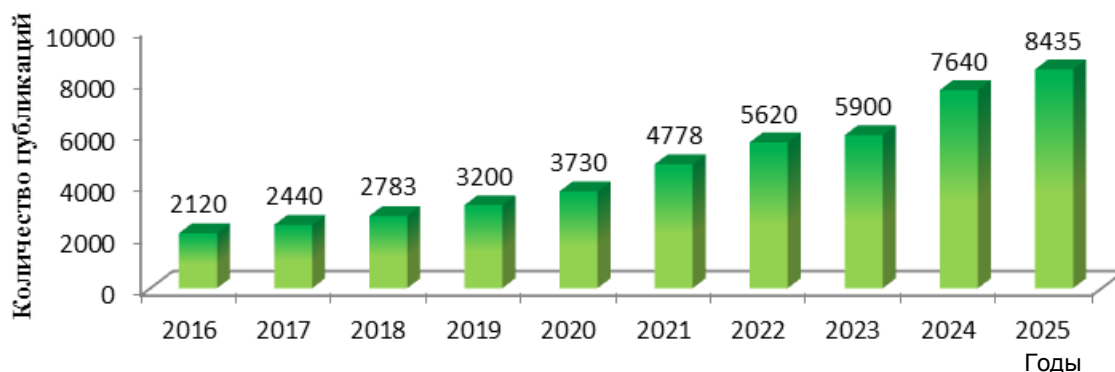


Рис. 1. Количество научных публикаций по теме «Additive ceramic manufacturing» на портале ScienceDirect

Существует два типа методов изготовления сложнопрофильных керамических изделий с применением АТ: прямые и непрямые. Процесс изготовления изделия прямыми методами, такими как селективное лазерное сплавление и селективное лазерное спекание, представляет собой нанесение керамического материала в виде сухого порошка на рабочую поверхность, при этом объединяет стадию формования и консолидации в одном цикле. Непрямые методы АТ, используемые для получения керамики, включают ряд технологических операций: 3D-печать, выжигание связующего и спекание. К непрямым методам АТ относят: лазерную стереолитографию (Stereolithography Apparatus – SLA), цифровую обработку светом, струйную печать связующим, послойное наплавление керамополимерного филамента и др. Несмотря на тот факт, что прямые методы АТ основаны на меньшем количестве операций по сравнению с непрямыми, их применение для 3D-печати керамики ограничено ввиду высокой температуры плавления керамических материалов ($>1800\text{ }^{\circ}\text{C}$) [7–12].

В качестве материала для 3D-печати непрямыми методами, как правило, выступает композиция, включающая керамический порошок, связующее и различные поверхностно-активные добавки. Вид исходного материала для 3D-печати зависит от выбранной технологии [13–15].

Наиболее перспективной АТ для получения изделий со сложной формой (наличие элементов с криволинейной поверхностью, тонкой или толстой стенки) является метод SLA [16–18]. Принцип действия этого метода заключается в послойной фотополимеризации керамической пасты под воздействием ультрафиолетового излучения (УФ), которое засвечивает области в соответствии с программно-заданным контуром (рис. 2). В качестве материала для 3D-печати методом SLA используют специальную керамическую пасту, состоящую из фотополимерного связующего и керамического порошка. К основным достоинствам метода SLA относят высокую точность и свободу печати, что позволяет получать керамические изделия сложной геометрической формы с возможностью регулирования уровня физико-механических характеристик и структуры, к недостаткам – высокую стоимость оборудования и сложность синтеза материалов, обладающих высокой степенью светопоглощения (SiC и др.) [19, 20].

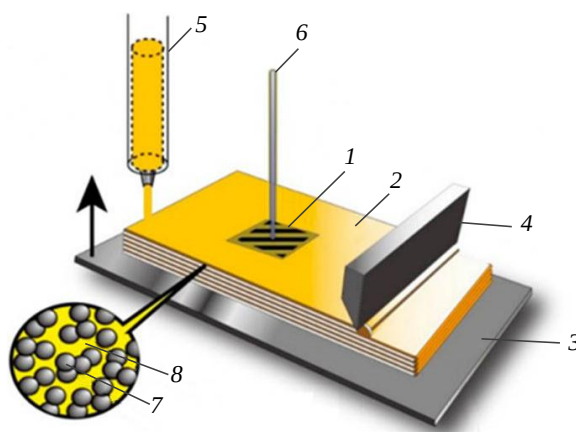


Рис. 2. Принцип действия технологии лазерной стереолитографии: 1 – печатаемое изделие; 2 – слой керамической пасты; 3 – платформа построения; 4 – ракель; 5 – система подачи керамической пасты; 6 – УФ-лазер; 7 – частицы оксида циркония; 8 – фотоотверждаемое полимерное связующее

Для получения бездефектных изделий методами АТ важно подготовить однородную и гомогенную керамическую пасту. Для этого необходимо, во-первых, подготовить керамический порошок. Размер и морфология частиц порошка, его химический состав оказывают прямое влияние на качество получаемого материала. В большинстве случаев порошок включает частицы оскольчатого типа ввиду сложности получения сферической формы. Для обеспечения полного вмешивания связующего в керамический порошок также необходимо, чтобы средний размер частиц не превышал 25 мкм. Мелкие частицы могут привести к их агломерации, а крупные – к снижению качества 3D-печати. Помимо этого, предпочтительно использование порошка с разным фракционным составом с целью обеспечения наиболее плотной упаковки частиц. Важно учитывать химический состав порошка: низкая химическая чистота исходных компонентов может привести к получению изделия с недостаточным уровнем физико-механических характеристик.

Во-вторых, необходимо правильно подобрать фотополимерное связующее. Как правило, связующее состоит из мономеров и/или олигомеров с винильными и акрилатными

группами. Данные фотополимеры имеют ряд преимуществ перед эпоксидными и полиэфирными соединениями: высокая реакционная способность, низкая вязкость, отверждение фотополимеров без выделения побочных продуктов. Для ускоренного инициирования фотополимеризации в связующее вводят различные фотоинициаторы. Преимущественно используют фотоинициаторы первого типа и именно те, которые обладают наибольшей абсорбционной способностью при заданной длине волны. Для минимизации тиксотропного и дилатантного поведения керамических паст в связующее вводят смачивающе-диспергирующие добавки.

В-третьих, после подготовки керамического порошка и фотополимерного связующего их необходимо смешать определенным образом [15, 21–26]. В противном случае гомогенность пасты не будет обеспечена, что приведет к браку.

Как указано ранее, синтез керамических материалов, обладающих высокой степенью светопоглощения, существенно усложнен при реализации метода SLA. Поэтому наиболее часто с использованием данной технологии синтезируют материалы с низкой степенью светопоглощения, такие как оксид алюминия и оксид циркония. Методом SLA из керамических паст на основе оксида циркония получают как различные конструкционные изделия (износостойкие детали, компоненты для насосов, элементы плунжеров насосов, пары трения и др.), так и изделия медицинского назначения, в основном в области стоматологии (зубные импланты).

Цель данной работы – получение высоконаполненной керамической пасты с содержанием оксида циркония до 81 % (по массе) и изготовление из нее керамики методом SLA.

Материалы и методы

Керамическую пасту получали путем смешивания керамического порошка оксида циркония и фотоотверждаемого полимерного связующего. В качестве твердой составляющей использовали порошок оксида циркония в тетрагональной модификации, в качестве связующего – композицию на основе акрилатных мономеров и олигомеров с фотоинициатором с высокой абсорбционной способностью.

Распределение частиц порошка оксида циркония по размеру представлено на рис. 3. Средний размер частиц составил 1,08 мкм.

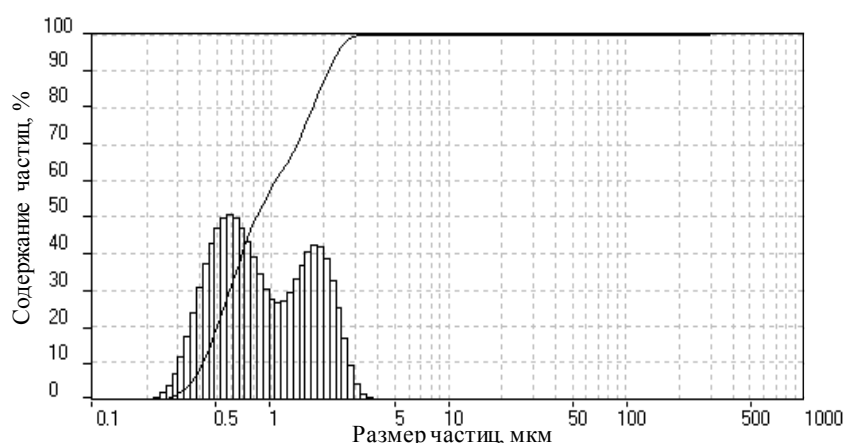


Рис. 3. Распределение частиц порошка оксида циркония по размеру

Методом SLA получены образцы из керамической пасты на основе оксида циркония. В ходе исследований подобрана оптимальная мощность лазера для 3D-печати.

После 3D-печати провели выжигание связующего и спекание. При исследовании микроструктуры спеченных керамических образцов использованы современные методы электронной микроскопии. Исследование механических свойств (прочность при изгибе, микротвердость) проводили на современных испытательных машинах в соответствии с ГОСТами и методиками испытаний. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания.

Результаты и обсуждение

Важным аспектом получения керамических паст, применяемых для 3D-печати методом SLA, является исследование их реологических характеристик. Для исследования динамической вязкости и скорости сдвига изготовлены керамические пасты с различным содержанием порошка оксида циркония и фотоотверждаемого полимерного связующего без смачивающе-диспергирующих добавок. Данные характеристики исследовали на ротационном вискозиметре в интервале скоростей сдвига $0\text{--}100\text{ с}^{-1}$ при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фотоотверждаемые полимерные связующие характеризуются ньютоновским поведением, высоконагруженные керамические пасты проявляют неньютоновское поведение из-за диспергированной твердой фазы (рис. 4). Такое поведение керамических паст является предпочтительным для процесса SLA. Оно предотвращает седиментацию частиц в пасте в состоянии покоя и способствует адекватному течению при сдвиге.

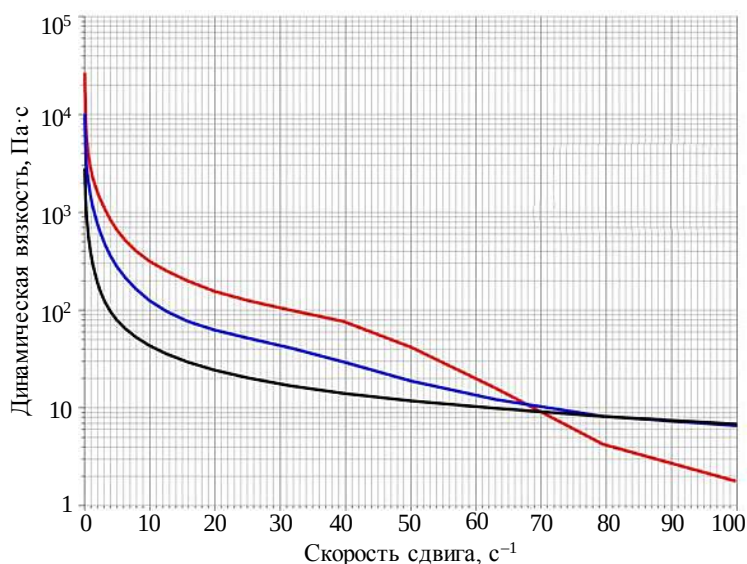


Рис. 4. Зависимости динамической вязкости керамических паст с содержанием оксида циркония 70 (—), 75 (—) и 80 % (по массе) (—) от скорости сдвига

Однако полученные результаты показали, что у керамических паст с содержанием порошка оксида циркония более 70–75 % (по массе) наблюдается переход из пастообразного состояния в пластичное. Поэтому в состав керамической пасты введены смачивающе-диспергирующие добавки, определена динамическая вязкость данных композиций и получены зависимости динамической вязкости (при скорости сдвига 30 с^{-1}) от содержания порошка ZrO_2 (рис. 5). Введение добавок позволило не только исключить переход пасты в пластичное состояние, но и увеличить содержание порошка оксида циркония до 81 % (по массе). При этом паста, в состав связующего которой введены смачивающе-диспергирующие добавки, не проявляла тиксотропного и дилатантного поведения.

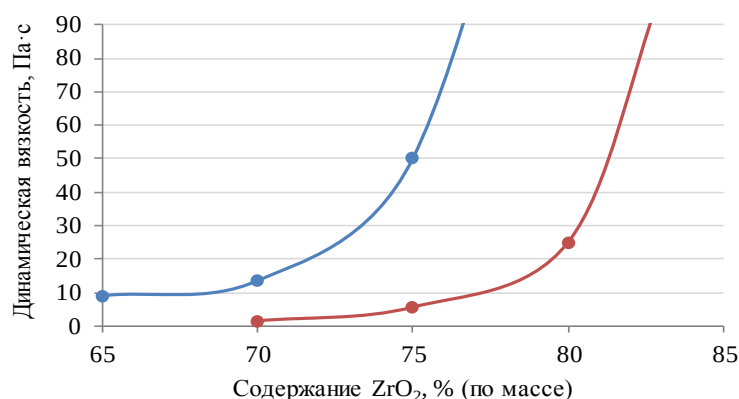


Рис. 5. Зависимости динамической вязкости (при скорости сдвига 30 с^{-1}) экспериментальных составов керамических паст со смачивающе-диспергирующими добавками (—) и без них (—) от содержания порошка ZrO_2

После получения керамической пасты на основе оксида циркония методом SLA изготовлены образцы, представляющие собой параллелепипеды с габаритными размерами $50 \times 12 \times 4 \text{ мм}$. Величину мощности УФ-лазера подбирали с учетом того, что глубина отверждаемого слоя должна быть в 3–4 раза больше, чем толщина наносимого слоя (50 мкм). При засвечивании керамической пасты УФ-лазером мощностью 300–400 мВ глубина отверждаемого слоя составляет $\sim(150\text{--}200)$ мкм, что обеспечивает достаточную адгезионную связь между слоями. При меньшей мощности печати глубины отверждаемого слоя будет недостаточно, что приведет к отслаиванию слоев друг от друга. При высокой мощности лазера слои будут переотверждаться, что также приведет к нарушению их целостности и, как следствие, к браку самого изделия.

Образцы, полученные методом SLA, после изготовления подвергали термическому удалению фотоотверждаемого полимерного связующего. Для предотвращения возникновения трещин в процессе отжига скорость нагрева должна быть низкой. Высокие скорости нагрева приведут к резкой потере массы изделия за счет слишком интенсивного высвобождения связующего. Для определения температурного интервала удаления фотоотверждаемого полимерного связующего из образца проведен термогравиметрический анализ (рис. 6). Установлено, что потеря массы образца начинается при температуре $\sim 180^\circ\text{C}$. Скорость разложения фотоотверждаемого полимерного связующего значительно увеличивается при достижении 330°C , при нагреве образцов до температуры $>450^\circ\text{C}$ происходит полное разложение связующего.

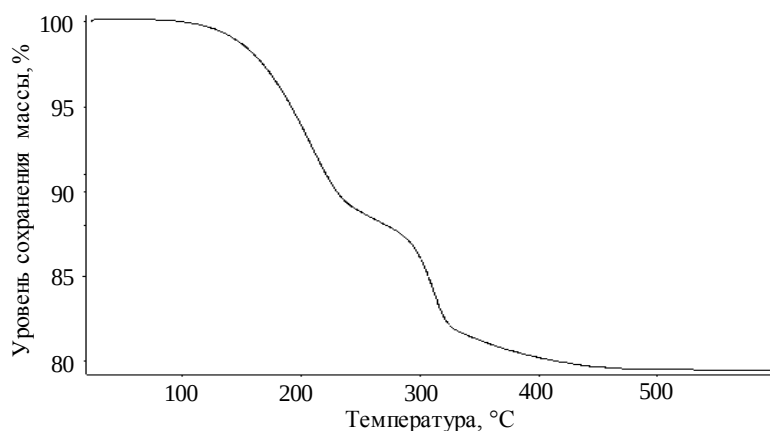


Рис. 6. Термогравиметрическая кривая образца из пасты на основе оксида циркония, полученного методом лазерной стереолитографии

Изделия, полученные методом SLA, претерпевают термическое воздействие (выжигание связующего и спекание), при котором изменяется их масса, поэтому необходимо учитывать усадку образцов. Усадка определена путем сопоставления исходных размеров 3D-модели и полученного образца после полного цикла керамического аддитивного производства. Полученные результаты (рис. 7) позволили определить коэффициенты масштабирования для керамики на основе оксида циркония, полученной методом SLA: $0,25 \times 0 \times 0,25$ % (длина $\times$ ширина $\times$ высота).

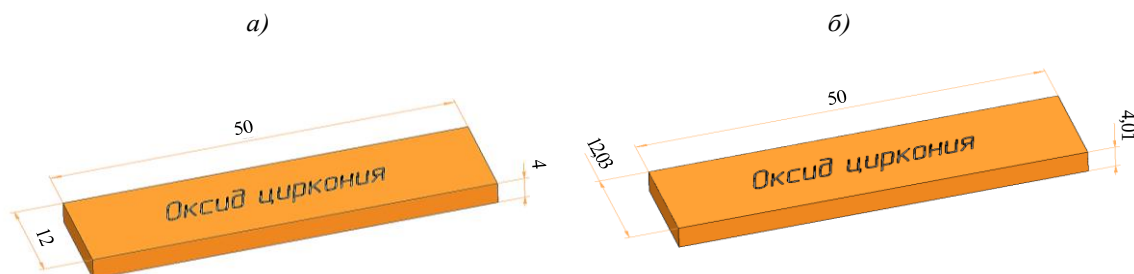


Рис. 7. Размеры 3D-модели (а) и образцов после полного цикла аддитивного производства (б)

Для обеспечения требуемых физико-механических характеристик после удаления фотоотверждаемого полимерного связующего проведено спекание полученных образцов при температурах 1500–1600 °С в воздушной среде.

Керамика, полученная методом SLA из пасты на основе оксида циркония, обладает равномерной низкопористой мелкокристаллической структурой (рис. 8). Размер зерен не превышает 1 мкм.

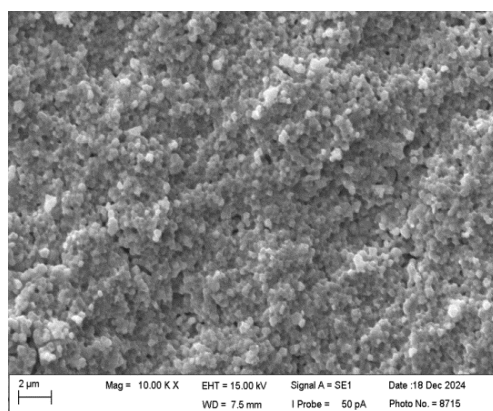


Рис. 8. Структура керамического материала на основе ZrO_2

Установлено, что физико-механические и теплофизические характеристики образцов, полученных методом SLA из пасты на основе оксида циркония, сопоставимы с показателями образцов, изготовленных для сравнения традиционным методом – полусухим прессованием с последующим спеканием при температурах 1600–1700 °С (см. таблицу). При этом из керамической пасты на основе оксида циркония методом SLA можно получать изделия сложной формы с регулируемой структурой и необходимым уровнем физико-механических и теплофизических характеристик, что обеспечивается за счет возможности изменения режимов удаления фотоотверждаемого полимерного связующего и спекания изделий. Изменение технологических параметров 3D-печати (мощность лазера, скорость и траектория засвечивания) также могут оказывать влияние на качество конечного изделия.

Свойства керамики на основе ZrO_2

Свойства	Значения свойств для образцов	
	из керамической пасты, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ	керамики, полученной традиционным методом
Плотность, г/см ³	5,5–5,8	5,5–5,9
Температурный коэффициент линейного расширения (при 20–1600 °С) $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	10,5	11,0
Микротвердость, ГПа	10,6–12,5	12,0

Следует отметить, что при получении изделий сложной формы методом SLA часто используются поддерживающие структуры. Они необходимы для сохранения целостности нависающих и/или тонкостенных элементов изделия. Как правило, удаление поддерживающих структур происходит механически после 3D-печати изделия до начала следующих этапов, таких как отжиг и спекание. Проектирование поддерживающих структур осуществляется таким образом, чтобы их механическое удаление не привело к нарушению целостности напечатанного изделия.

Примеры изделий из керамики на основе оксида циркония, полученной методом SLA в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, приведены на рис. 9.

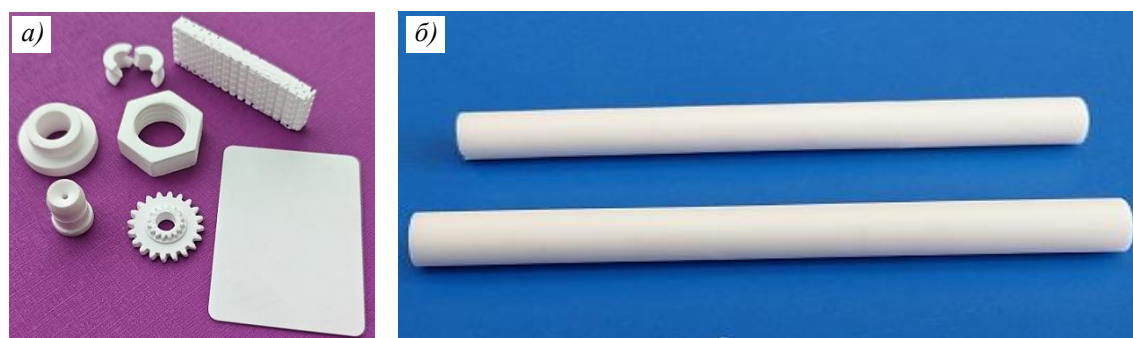


Рис. 9. Изделия различной конфигурации (а) и штифты для высокотехнологичного оборудования (б) из керамики на основе оксида циркония, полученные методом лазерной стереолитографии

Заключение

Разработана высоконаполненная керамическая паста с содержанием порошка оксида циркония до 81 % (по массе), позволяющая получать керамику методом SLA. Данный керамический материал можно применять для изготовления сложнопольных изделий, используемых в авиации, двигателестроении, ракетно-космической технике и микроэлектронике, в качестве комплектующих научно-исследовательского и технологического оборудования. Возможно регулирование структуры и уровня физико-механических и теплофизических характеристик изделий, полученных из разработанной керамической пасты на основе оксида циркония, что существенно увеличивает область их применения.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ организован полный цикл аддитивного керамического производства, позволяющий получать сложные керамические изделия из пасты на основе оксида циркония методом SLA.

Список источников

1. Житнюк С.В., Медведев П.Н., Сорокин О.Ю., Качаев А.А. Формирование кристаллографической текстуры в поликристаллической керамике как способ повышения свойств (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). С. 74–86. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.

2. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). С. 81–92. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. 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> (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-85-103.
4. Толмачев Я.В., Заварзин С.В., Лощина А.О., Князев А.В. Высокотемпературная оксидная коррозия керамических материалов ГТД // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). С. 69–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
5. Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Варрик Н.М., Самородова О.Н. Изучение структуры и свойств керамических композиционных материалов на основе муллита // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 54–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
6. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
7. Bellini A., Shor L., Guceri S.I. New developments in fused deposition modeling of ceramics // Rapid Prototyping Journal. 2005. Vol. 11. P. 214–220.
8. Gonzalez J.A., Mireles J., Lin Y. et al. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology // Ceramic International. 2016. Vol. 42. P. 10559–10564.
9. Kiriha S. Additive manufacturing of ceramic components using laser scanning stereolithography // Welding in the World. 2016. Vol. 60. P. 697–702.
10. Faes M., Vleugels J., Vogeler F. et al. Extrusion-based additive manufacturing of ZrO_2 using photoinitiated polymerization // Journal of Manufacturing Science and Technology. 2016. Vol. 14. P. 28–34.
11. Zhou W., Li D., Chen Z. The influence of ingredients of silica suspensions and laser exposure on uv-curing behavior of aqueous ceramic suspensions in stereolithography // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 52. P. 575–582.
12. Witkowski S., Lange R. Stereolithography as an additive technique in density // Schweiz Monatsschr Zahmed. 2003. Vol. 113 (8). P. 868–884.
13. Pfaffinger M., Mitteramskogler G., Gmeiner R. et al. Thermal debinding of ceramic-filled photopolymers // Materials Science Forum. 2015. Vol. 825. P. 75–81.
14. Xu G., Zhao W., Lu B. Fabrication of microstructures using high-resolution stereolithography system // Journal of Mechanical Engineering. 2005. Vol. 9. P. 86–89.
15. Xing H., Zou B., Li S. et al. Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO_2 ceramic components by laser scanning stereolithography // Ceramics International. 2017. Vol. 43 (18). P. 16340–16347.
16. Chen Z., Li Z., Li J. et al. 3D printing of ceramics: a review // Journal of the European Ceramic Society. 2019. Vol. 39 (4). P. 130–145.
17. Zocca A., Colombo P., Gomes C.M. et al. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities // Journal of the American Ceramic Society. 2015. Vol. 98. P. 1983–2001.
18. Xu Y., Wu X., Guo X. et al. The boom in 3D-printed sensor technology // Sensors. 2017. Vol. 17. P. 2439–2441.
19. Wu Z., Liu W., Wu H. et al. Research into the mechanical properties, sintering mechanism and microstructure evolution of Al_2O_3 – ZrO_2 composites fabricated by a stereolithography-based 3D printing method // Materials Chemistry and Physics. 2018. Vol. 207. P. 1–10.
20. Dehurtevent M., Robberecht L., Hornez J.C. et al. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing // Dental Materials. 2017. Vol. 33. P. 477–485.
21. Falkowski P., Grzelak A. Effect of solvents on curing process of photopolymerizable ceramic suspensions // Archives Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58. P. 1411–1414.

22. Weng Z., Zhou Y., Lin W. et al. Structure-property relationship of nano enhanced stereolithography resin for desktop SLA 3D printer // *Composites*. 2016. Vol. 88. P. 234–242.
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.
24. De 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.
25. Zakeri S., Vippola M., Levanen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 35. P. 101–177.
26. Manapat J.Z., Chen O., Ye P. et al. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017. Vol. 302 (9). P. 1–13.

References

1. Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N., Sorokin O.Yu., Kachaev A.A. Formation of crystallographic texture in polycrystalline ceramics as a way to enhance properties (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), pp. 74–86. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 08, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-74-86.
2. Slavin A.V., Donetskiy K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), pp. 81–92. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 08, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. 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> (accessed: April 08, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-85-103.
4. Tolmachev Ya.V., Zavarzin S.V., Loshchinina A.O., Knyazev A.V. High temperature oxide corrosion of ceramic materials in turbine engines. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 69–83. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 08, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
5. Babashov V.G., Maksimov V.G., Varrik N.M., Samorodova O.N. Studying of structure and properties of samples of ceramic composite materials on the basis of mullite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 54–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-54-63.
6. Kablov E.N. Dominant of the national technological initiative. *Metally Eurazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
7. Bellini A., Shor L., Guceri S.I. New developments in fused deposition modeling of ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, 2005, vol. 11, pp. 214–220.
8. Gonzalez J.A., Mireles J., Lin Y. et al. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramic International*, 2016, vol. 42, pp. 10559–10564.
9. Kirihaara S. Additive manufacturing of ceramic components using laser scanning stereolithography. *Welding in the World*, 2016, vol. 60, pp. 697–702.
10. Faes M., Vleugels J., Vogeler F. et al. Extrusion-based additive manufacturing of ZrO₂ using photoinitiated polymerization. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, vol. 14, pp. 28–34.
11. Zhou W., Li D., Chen Z. The influence of ingredients of silica suspensions and laser exposure on uv-curing behavior of aqueous ceramic suspensions in stereolithography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 52, pp. 575–582.
12. Witkowski S., Lange R. Stereolithography as an additive technique in density. *Schweiz Monatsschr Zahmed*, 2003, vol. 113 (8), pp. 868–884.
13. Pfaffinger M., Mitteramkogler G., Gmeiner R. et al. Thermal debinding of ceramic-filled photopolymers. *Materials Science Forum*, 2015, vol. 825, pp. 75–81.
14. Xu G., Zhao W., Lu B. Fabrication of microstructures using high-resolution stereolithography system. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, vol. 9, pp. 86–89.

15. Xing H., Zou B., Li S. et al. Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO_2 ceramic components by laser scanning stereolithography. *Ceramics International*, 2017, vol. 43 (18), pp. 16340–16347.
16. Chen Z., Li Z., Li J. et al. 3D printing of ceramics: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39 (4), pp. 130–145.
17. Zocca A., Colombo P., Gomes C.M. et al. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, vol. 98, pp. 1983–2001.
18. Xu Y., Wu X., Guo X. et al. The boom in 3D-printed sensor technology. *Sensors*, 2017, vol. 17, pp. 2439–2441.
19. Wu Z., Liu W., Wu H. et al. Research into the mechanical properties, sintering mechanism and microstructure evolution of Al_2O_3 – ZrO_2 composites fabricated by a stereolithography-based 3D printing method. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 207, pp. 1–10.
20. Dehurtevent M., Robberecht L., Hornez J.C. et al. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing. *Dental Materials*, 2017, vol. 33, pp. 477–485.
21. Falkowski P., Grzelak A. Effect of solvents on curing process of photopolymerizable ceramic suspensions. *Archives Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, pp. 1411–1414.
22. Weng Z., Zhou Y., Lin W. et al. Structure-property relationship of nano enhanced stereolithography resin for desktop SLA 3D printer. *Composites*, 2016, vol. 88, pp. 234–242.
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.
24. De 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.
25. Zakeri S., Vippola M., Levanen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, pp. 101–177.
26. Manapat J.Z., Chen O., Ye P. et al. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, vol. 302 (9), pp. 1–13.

Информация об авторах

Турченко Максим Витальевич, инженер 2 категории, 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

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

Чайникова Анна Сергеевна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гамазина Мария Васильевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Светогоров Константин Игоревич, ведущий инженер-конструктор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim V. Turchenko, Second Category 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

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

Anna S. Chaynikova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Konstantin I. Svetogorov, Leading Design Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.06.2026.

The article was submitted 29.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 04.06.2026.