
Научная статья

УДК 66.017:666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

М.В. Турченко¹, Ю.Е. Лебедева¹, И.О. Беляченков¹, В.А. Прокофьев¹

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

Аннотация. К основным преимуществам аддитивных технологий (АТ) относят возможность изготовления деталей сложной конфигурации внешнего и внутреннего строения, а также коэффициент использования материала, близкий к единице. Традиционные методы получения изделий из керамических материалов не могут конкурировать по данному показателю с АТ. Рассмотрен принцип метода стереолитографии. Представлены результаты получения керамических изделий различной сложности методом стереолитографии. Описаны методы получения керамической пасты, из которой получают изделия.

Ключевые слова: стереолитография, керамические материалы, аддитивные технологии, 3D-печать, аддитивное производство, фотоотверждаемый полимер

Для цитирования: Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Беляченков И.О., Прокофьев В.А. Получение керамических материалов методом стереолитографии // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.

Scientific article

OBTAINING OF CERAMIC MATERIALS BY STEREO LITHOGRAPHY METHOD

M.V. Turchenko¹, Yu.E. Lebedeva¹, I.O. Belyachenkov¹, V.A. Prokofiev¹

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 main advantages of additive technologies (AT) include the possibility of obtaining parts of a complex configuration of the external and internal structure, as well as the material utilization factor, which is close to unity. For example, traditional methods for producing products from ceramic materials cannot compete with AT in this parameter. In this review, the principle of the stereolithography method is considered, works are presented, the purpose of which is to obtain ceramic products of varying complexity by stereolithography, a description of the methods for obtaining ceramic paste, from which products are obtained.

Keywords: stereolithography, ceramic materials, additive technologies, 3D printing, additive manufacturing, photocurable polymer

For citation: 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), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.

Введение

Новые методы получения изделий из керамических материалов набирают все большую популярность. Из всего разнообразия методов самым востребованным является аддитивное производство, когда изделия изготавливают путем послойного наращивания и синтеза объектов [1–3].

К основным преимуществам аддитивных технологий (АТ) относят возможность получения деталей сложной конфигурации не только внешнего, но и внутреннего строения. Кроме того, коэффициент использования материала близок к единице. Традиционные методы получения изделий из керамических материалов не могут конкурировать по данному показателю с АТ [4, 5]. При использовании АТ сокращается цикл получения изделия, поскольку отсутствует необходимость затрачивать большое количество времени и производственных ресурсов на создание литейных форм. При этом не составляет труда быстро изменять конструкцию, форму и размеры детали.

К сожалению, АТ обладают рядом недостатков, среди которых высокая стоимость оборудования, необходимость в высокой квалификации оператора и небольшие объемы производства.

Следует обратить внимание на еще одну ключевую составляющую АТ, применяемых для получения керамических изделий: исходный порошковый материал. Его гранулометрический состав, физико-химические свойства и морфология зачастую определяют характеристики готовой детали. Керамические изделия, полученные с помощью АТ, применяют в отраслях, где предъявляются исключительно высокие требования к свойствам материалов: авиастроение, биомедицина и электроника. Например, получение форм для литья лопаток газотурбинного двигателя, медицинских имплантатов, керамических подложек для электроники [6–8].

В данной статье рассмотрены принципы метода стереолитографии, получение керамической пасты для печати и изготовление керамических изделий различной сложности этим методом.

Метод стереолитографии

Существует множество АТ, позволяющих получать керамические изделия сложной конфигурации: 3D-печать на основе лазерного порошкового формования, наплавка керамики, струйное нанесение, селективное лазерное плавление, селективное лазерное спекание, лазерная стереолитография (SLA).

Методом SLA получают изделия в результате фотополимеризации пасты слой за слоем с использованием ультрафиолетового (УФ) лазерного луча, который засвечивает необходимые участки заданной траектории. Керамическая паста состоит из частиц керамического порошка (Al_2O_3 , SiC, ZrO_2 , SiO_2 , Si_3N_4 и др.) и фотополимерного связующего. После окончания 3D-печати полученную «зеленую» заготовку подвергают отжигу при определенном режиме в зависимости от материала с целью удаления из изделия фотополимерного связующего и последующего спекания.

Согласно данным научного портала ScienceDirect, интерес исследователей со всего мира к методу SLA для получения керамических материалов за последние пять лет (2018–2022 гг.) значительно возрос, что подтверждает увеличившееся в 3 раза количество цитирований «Laser stereolithography of ceramics» в научных статьях (рис. 1).

Лазерная стереолитография – это один из методов непрямого аддитивного производства, используемый для формирования керамических композитов с полимерной матрицей (т. е. «зеленой» керамики) и обеспечивающий высокое разрешение и свободу печати. Помимо преимуществ, следует упомянуть и о некоторых недостатках. Оптические

свойства порошков должны соответствовать свойствам связующего, чтобы обеспечить определенную глубину отверждения. Если порошок будет отражать УФ-излучение, латеральное разрешение отпечатанного среза неизбежно уменьшится. Например, в работе [9] исследована возможность применения метода SLA в аддитивном производстве бесвинцовой пьезокерамики BaTiO_3 . Данный материал сложно использовать в аддитивном производстве вследствие высокого коэффициента рассеяния света в УФ-диапазоне (2,66–2,84). Например, для Al_2O_3 коэффициент находится в пределах 1,79–1,80, для ZrO_2 – в пределах 2,22–2,26. Другим ограничивающим фактором является высокий уровень светопоглощения BaTiO_3 в рабочем диапазоне длин волн лазерного излучения (300–420 нм). В указанном диапазоне керамика из BaTiO_3 поглощает около 70 % света на длине волны ~355 нм, что соответствует типичной длине волны для 3D-принтеров.

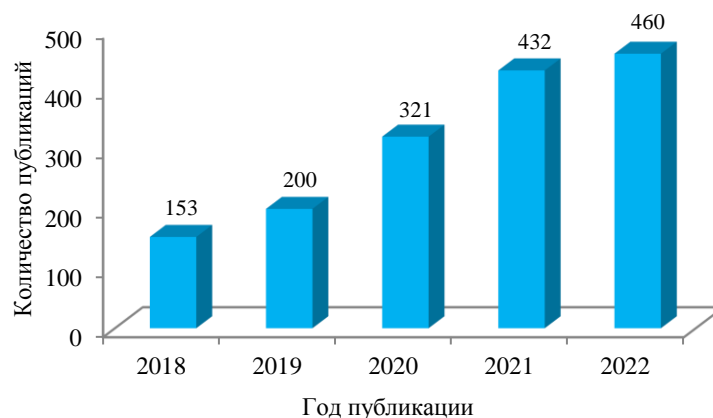


Рис. 1. Количество статей, цитирующих «Laser stereolithography of ceramics» на портале ScienceDirect, по годам их публикаций

Авторы работы [9] подтвердили возможность применения BaTiO_3 в аддитивном производстве, если длина волны превышает 400 нм, а интенсивность света более 25 Дж/см^2 . При исходных параметрах длины волны источника света (355 нм) по результатам анализа (рентгенофазовый анализ и сканирующая электронная микроскопия), проведенного после полного цикла термической обработки, выявлены дефекты микро- и макроструктуры заготовок. Подразумевается, что их появление связано с низким объемным наполнением заготовки керамическими частицами. Следует отметить, что при 70 % поглощения света содержание порошка в пасте составляло до 25 % (объемн.).

«Зеленые» заготовки из керамики получают формированием пасты (или суспензии), состоящей из мелкодисперсных порошков, диспергированных в жидкой среде с органическими добавками (т. е. связующими, диспергаторами). После заготовки детали подвергают термической обработке сначала при низких температурах (200–500 °С) для удаления органической части, а затем при более высоких (>1000 °С) для консолидации порошков посредством спекания. Чем мельче частицы порошков, тем легче будет проходить спекание при условии тесного контакта порошков. Близкое расположение частиц друг к другу означает, что их упаковка в суспензии должна быть максимально возможной. Размер частиц и загрузка порошков в сочетании с неправильной формой увеличивают площадь их поверхности и, следовательно, вязкость суспензии. В стереолитографии «сверху вниз» объект растет слой за слоем на строительной платформе, которая постепенно погружается в ванну с керамической пастой. Для того чтобы отвержденный слой повторно покрывался пастой и затвердел для формирования нового слоя, платформа выполняет вертикальное перемещение, двигаясь сначала вниз, а затем

вверх. Когда платформа погружается, свежая суспензия самотеком стекает на ранее отвержденный слой. При хорошем смачивании затвердевшего слоя пастой однородность толщины нового слоя будет зависеть от вязкости суспензии. Это явление связано с реологическим поведением суспензии и площадью поверхности, подлежащей покрытию. Дефекты появляются, когда баланс между значениями поверхностного натяжения не достигается, потому что силы межмолекулярного сцепления жидкой суспензии больше, чем силы сцепления между жидкой суспензией и твердой подложкой (т. е. платформой или предыдущим слоем). Одним из способов решения этих проблем является введение движущейся части (ракеля), которая распределяет пульпу. Такой подход является разновидностью ленточной заливки для нанесения монослоев и позволяет использовать высоковязкие суспензии, но усложняет систему, поскольку необходимо контролировать движущиеся части. Кроме того, необходимо точно настроить реологическое поведение суспензии относительно скорости ракеля, чтобы избежать передачи напряжения сдвига на нижние слои и разрушения уже напечатанного объекта [10].

Получение керамических паст и суспензий для лазерной стереолитографии

В большинстве исследований для получения керамических паст и суспензий методом SLA используют составы, отвечающие следующим требованиям: содержание твердого вещества ≥ 40 % (объемн.) и вязкость ≤ 3 Па·с. Исключением являются работы, в которых применяют высоковязкие керамические суспензии в дифференцированном оборудовании. Авторы работы [11] для изготовления деталей из диоксида циркония с вязкостью ~ 7 Па·с использовали принтер Admaflex 130 (фирма ADMATEC Europe BV, Нидерланды). В этом оборудовании применяется технология ленточной заливки для создания слоев, а его транспортная система позволяет работать с высоковязкими суспензиями. В работах [12, 13] использовали систему Ceramaker 300 (фирма 3D CERAM, Франция) для печати керамических деталей из суспензий вязкостью до 28,2 Па·с. Авторы работ [14, 15] печатали керамические детали из суспензий с твердой загрузкой 50 % (объемн.) и более. Однако они применяли водные суспензии, которые давали отвержденное керамическое сырое тело низкой прочности, что затрудняло постобработку.

С другой стороны, все описанные неводные составы включали мономер HDDA (гександиолдиакрилат), отличающийся низкой вязкостью (~ 9 мПа·с) и способностью создавать шитые сети. Исключением является исследование авторов работы [16], которые использовали монофункциональный полярный мономер с низкой вязкостью 2-гидроксиэтилакрилат (2-HEA) в сочетании со сшивающими агентами HDDA и ТМРТА (триметилпропантриакрилат) и показали, что можно получить высоконагруженные суспензии без инертных разбавителей.

Во многих исследованиях [10–25] использовали диспергаторы, а также реакционноспособные акрилатные поверхностно-активные вещества (ПАВ) с хорошим сродством к керамическим частицам, такие как 2-HEA с концевыми гидроксильными группами и 3-метакрилоксипропилтриметоксисилан. Данные ПАВ одновременно способствуют диспергированию частиц в суспензии и повышают механическую стойкость печатной детали. Кроме того, заметное влияние оказывали размер и форма частиц. Исследования показали, что частицы диаметром > 1 мкм минимизируют силы притяжения и снижают вязкость, но они плохо подходят для спекания. Если механическое сопротивление и пористость детали не имеют большого значения, приемлемы и более крупные частицы. Тем не менее отличные результаты также достигнуты для субмикронных частиц с использованием более качественных керамических порошков с малой площадью поверхности (больше сферических частиц).

В работе [17] приведен метод получения керамических паст для изготовления изделия с помощью 3D-принтера, реализующего принцип SLA. Предложен способ получения суспензии, который заключается в диспергировании керамических порошков в отверждаемой ультрафиолетом среде [18]. Данная среда, как правило, состоит из мономеров и фотоактивных компонентов. В качестве альтернативы также можно использовать среду, состоящую из отверждаемой ультрафиолетом смолы в качестве связующего и метанола в качестве растворителя. Следует отметить, что растворитель удаляется с помощью специального испарителя, что приводит к усадке объема осажденного слоя суспензии. Зафиксировано упрочнение керамической суспензии за счет УФ-излучения. Не только крупные керамические частицы заметно снижают скорость реакции фотополимеризации, но и мелкие. Последнее может быть связано с увеличением центров рассеяния [19].

Суспензии, которые используются при получении керамических изделий с помощью 3D-принтера, реализующего принцип стереолитографии, представляют собой пасты как низкой, так и высокой вязкости [20].

Вязкость керамических суспензий уменьшается с повышением температуры. Для суспензий с низким содержанием твердых частиц снижение вязкости в основном связано с уменьшением вязкости среды, которая пропорциональна экспоненциальной функции обратной зависимости температуры в соответствии с соотношением Аррениуса:

$$\eta = A_{\text{exp}}(E_a/RT),$$

где A – константа пропорциональности; E_a – кажущаяся энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Однако из-за высокой чувствительности относительной вязкости к твердой фракции для высоконагруженных суспензий эффект термического разбавления также значителен. Тепловое расширение жидкой среды (мономеров и разбавителей) значительно больше, чем у керамических частиц, что снижает кажущуюся объемную долю твердого наполнителя и вязкость. Авторы работы [21] использовали безразмерное напряжение сдвига τ_r для сравнения суспензий с различной температурой T и радиусом частиц a в уравнении

$$\tau_r = \frac{\eta \dot{\gamma} a^3}{k_b T},$$

где τ_r – напряжение сдвига; η – вязкость; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига (градиент скорости); a – радиус частиц; T – температура; k_b – коэффициент безразмерной регулируемой константы.

Повышение температуры не только снижает вязкость суспензии, но и изменяет ее реологическое поведение. Например, критическое напряжение сдвига увеличивается с повышением температуры, начало утолщения при сдвиге смещается к более высоким скоростям сдвига. Исследовано влияние повышенной температуры на улучшение печатных свойств керамических суспензий. Показано, что за счет повышения температуры можно получать высоконагруженные суспензии с более низкой вязкостью, хотя для этого потребуются принтеры с контролем температуры и смолы без летучих органических компонентов [22].

В работе [23] приведен метод получения светочувствительной керамической суспензии из SiC для быстрой стереолитографии. Из полученной суспензии планировали получать изделия ответственного назначения (подшипники трансмиссии; элементы

аэрокосмического двигателя; оптические зеркала; элементы, используемые в атомной промышленности). Суспензию из SiC получали из частиц порошков SiC, SiO₂ и связующего, подвергаемого фотополимеризации в процессе печати. В качестве связующего использована светочувствительная смола, состоящая из HDDA, ТМРТА, диакрилата мономеров. В качестве фотоинициатора использовали 2,4,6-триметилбензоил, диспергатора – полиэтиленгликоль. Компоненты соединяли следующим образом: на первом этапе HDDA, ТМРТА, диакрилат равномерно перемешивали для получения светочувствительной смолы, в которую добавляли порошки SiC, SiO₂ крупной и мелкой фракции. Механически перемешивали и равномерно диспергировали до получения суспензии. Перед применением полученную суспензию дегазировали в вакууме. Для того чтобы убедиться в пригодности суспензии для 3D-печати, определяли ее стабильность методом статического осаждения и необходимые параметры (толщину отверждения, усадку и вязкость). Для печати выбирали суспензию с высоким содержанием твердого вещества, низкой седиментацией, большой толщиной отверждения и низкой вязкостью.

Изготовление керамических материалов методом лазерной стереолитографии

В работе [24] исследована возможность получения легкого оптического зеркала с помощью 3D-печати, реализующей принцип SLA. В качестве материала использовали керамическую суспензию из микронных частиц порошка SiC и мономеров смолы HDDA–ТМРТА с добавлением спекающих добавок Al₂O₃–Y₂O₃ [25]. Общая загрузка твердой фазы, включая частицы SiC и Al₂O₃–Y₂O₃ в суспензии, составляла 45 % (объемн.), вязкость: 2,1 Па·с при скорости сдвига 30 с⁻¹.

Из керамической суспензии получен образец в виде диска с шестиугольным внутренним заполнением, с тонкой микроструктурой и высокими механическими свойствами после полного цикла изготовления. По разрезу «зеленого» образца было видно, что он имел почти плотную, но слоистую микроструктуру. Явных трещин и пор не наблюдали (рис. 2, а). Полный цикл изготовления изделия включал получение 3D-модели, 3D-печать по методу SLA, выжигание фотополимерного связующего (отжиг), инфильтрацию и пиролиз при температуре 800 °С (рис. 2, б), спекание при температуре 1800 °С (рис. 2, в). Следует отметить, что на каждом из этапов пористость микроструктуры увеличивалась. Это обусловлено миграцией зерен при предварительном спекании за счет высокой температуры и позволяет сделать керамику более плотной. Поскольку для оптического зеркала достигнутой плотности было недостаточно, проведено восемь циклов инфильтрации и пиролиза (рис. 2, г). В результате плотность достигла ~93,5 %, что в свою очередь позволило получить легкое оптическое зеркало. Благодаря использованию метода SLA удалось уменьшить массу изделия на ~40,9 %. На рис. 3 представлены изображения легкого керамического оптического зеркала (с лицевой и оборотной сторон) из карбида кремния на всех этапах получения.

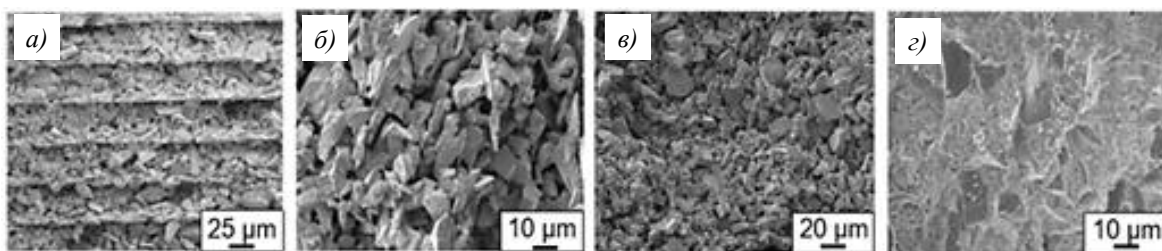


Рис. 2. Микроструктура «зеленого» образца (а), образца после пиролиза (б), после предварительного спекания (в) и финального образца (г)



Рис. 3. Легкое керамическое оптическое зеркало из карбида кремния: *a, б* – 3D-модель для стереолитографии; *в, г* – «зеленая» заготовка; *д, е* – заготовка после пиролиза; *ж, з* – предварительно спеченное изделие; *и, к* – конечное изделие

Авторы работы [26] получили стержни из диоксида циркония (ZrO_2) методом SLA. В исследовании применен типовой подход 3D-печати образцов, который заключался в использовании стандартного чередующегося шаблона растрового сканирования по осям x/y . Такой шаблон сканирования позволял уменьшить потенциальное коробление и концентрацию напряжения более эффективно, чем сканирование по отдельным осям x или y . Очевидно, что при том или ином направлении сканирования качество поверхности, механические свойства и микроструктура образцов будут меняться [27]. Для режима сканирования по осям x/y установлены следующие параметры: мощность лазера 300 мВт при длине волны 355 нм, диаметр пятна 35 мкм, скорость лазерного сканирования 5 м/с, глубина отверждения 50 мкм, ширина линии отверждения 80 мкм. «Зеленые» образцы подвергали отжигу при температуре 500 °С в атмосфере азота для удаления органических веществ и спеканию при температуре 1450 °С для достижения необходимых свойств. В качестве материала для получения стержней использовали керамическую суспензию, состоящую из 50 % (объемн.) диоксида циркония (диаметр частиц 200 нм) и светоотверждаемой акриловой смолы.

Оценка качества поверхности полученных образцов показала анизотропный характер шероховатости. Проблема была решена за счет шлифовки поверхностей, после которой шероховатость достигала нанометрового размера. Механические свойства образцов из ZrO_2 , напечатанных по 3D-технологии, сопоставимы со свойствами керамики, полученной традиционными методами: средняя прочность при изгибе 154–182 МПа, вязкость разрушения 6,3 МПа·м, твердость 13,9 ГПа.

Структура границ зерен исследована на горизонтальной и вертикальной поверхности образцов. В обоих направлениях наблюдали однородность распределения кристаллов, которая благоприятно влияет на механические свойства керамики из ZrO_2 . Исследование в полной мере подтверждает возможность использования метода SLA для получения изделий сложной формы из ZrO_2 . Свойства керамики будут соответствовать всем необходимым эксплуатационным требованиям.

Керамические материалы перспективны для изготовления теплонагруженных элементов конструкций наземных и авиационных газотурбинных установок и двигателей. При получении изделий сложной формы лимитирующей стадией процесса является механическая обработка [28–31]. Метод SLA позволяет получать из керамических

материалов изделия сложной конфигурации и с точными размерами без применения механической обработки.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы (ККМ)» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [32].

Заключения

В данной статье показана возможность получения керамических изделий методом SLA. Спектр используемых материалов, как и возможности самой технологии, велик. Приведенные методы получения керамической суспензии могут быть использованы для изготовления не прототипов, а реальных изделий, к свойствам которых предъявляют жесткие требования. Метод SLA перспективен при получении изделий из керамических паст на основе оксидов (Al_2O_3 , SiO_2 , Zr_2O_3 , TiO_2 и др.), нитридов (Si_3N_4 , AlN и др.), карбидов (SiC , TiC и др.).

Следует отметить и рассмотренные режимы печати, позволяющие облегчить выбор тех или иных параметров, что обеспечит получение бездефектного изделия. Рассмотрен также типовой подход 3D-печати, заключающийся в использовании стандартного чередующегося шаблона растрового сканирования. Показано, что метод стереолитографии позволяет получить изделия, не уступающие по свойствам изделиям, изготовленным традиционными способами, но при этом сокращаются количество циклов и сроки изготовления.

Список источников

1. Scheithauer U., Schwarzer E., Richter H.-J. et al. Thermoplastic 3D Printing – An Additive Manufacturing Method for Producing Dense Ceramics // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2014. Vol. 12. Is. 1. P. 1–6.
2. Zhangwei Ch., Ziyong Li, Junjie Li et al. 3D printing of ceramics: a review // *Journal of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39. P. 661–687.
3. Deckers J., Vleugels J., Kruth J.-P. Additive Manufacturing of Ceramics: a review // *Journal of Ceramic Science Technology*. 2014. Vol. 04. Is. 05. P. 245–260.
4. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технология аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: Техносфера, 2016. 83 с.
5. Круглов Д.В., Павлюкова Н.Л. Преимущества и недостатки аддитивных технологий // *Энергия*–2019. 2019. Т. 4. С. 65–66.
6. Williams C.B. Design and development of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure: Dissertation. Georgia Institute of Technology, 2008. 390 p.
7. Abouliatim Y., Chartier T., Abelard P. et al. Optical characterization of stereolithography alumina suspensions using the Kubelka–Munk model // *Journal of the European Ceramic Society*. 2009. Vol. 29. Is. 5. P. 919–924.
8. Badev A., Abouliatim Y., Chartier T. et al. Photopolymerization kinetics of a polyether acrylate in the presence of ceramic fillers used in stereolithography // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2011. Vol. 222. Is. 1. P. 117–122.
9. Смирнов А.В., Чугунов С.С., Тихонов А.А. Разработка и исследование методов аддитивного производства керамики BaTiO_3 с использованием процессов лазерной стереолитографии // *Перспективные технологии и материалы: материалы науч.-практич. конф. с междунар. участием*. Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2020. С. 182–185.
10. Santoliquido O., Camerota F., Rosa A. et al. A novel device to simply 3D print bulk green ceramic components by stereolithography employing viscous slurries // *Open Ceramics*. 2021. Vol. 5. P. 100089.

11. Bae C.-J., Halloran J.W. Concentrated suspension-based additive manufacturing – viscosity, packing density, and segregation // *Journal of European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39. P. 4299–4306.
12. Xing H., Zou B., Lai Q. et al. Preparation and characterization of UV curable Al_2O_3 suspensions applying for stereolithography 3D printing ceramic microcomponent // *Powder Technology*. 2018. Vol. 338. P. 153–161.
13. Xing H., Zou B., Liu X. et al. Effect of particle size distribution on the preparation of ZTA ceramic paste applying for stereolithography 3D printing // *Powder Technology*. 2020. Vol. 359. P. 314–322.
14. Griffith M.L., Halloran J.W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography // *Journal of American Ceramic Society*. 1996. Vol. 79. P. 2601–2608.
15. Wang Z., Huang C., Wang J. et al. Development of a novel aqueous hydroxyapatite suspension for stereolithography applied to bone tissue engineering // *Ceramic International*. 2019. Vol. 45. P. 3902–3909.
16. Zhang S., Sha N., Zhao Z. Surface modification of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ with dicarboxylic acids for the preparation of UV-curable ceramic suspensions // *Journal of European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. P. 1607–1616.
17. Декерс Дж., Влюгелс Дж., Крут Дж.-П. Аддитивное производство керамики: обзор // *Керамическая наука и технология*. 2014. Т. 5. № 4. С. 245–260.
18. Klocke F., Derichs C., Ader C. et al. Investigations on laser sintering of ceramic slurries // *Production Engineering*. 2007. Vol. 1. Is. 3. P. 279–284.
19. Travitzky N., Bonet A., Dermeik B. et al. Additive manufacturing of ceramic-based materials // *Advanced Engineering Materials*. 2014. Vol. 16. Is. 6. P. 729–754.
20. Tang H.H. Direct laser fusion to form ceramic parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8. Is. 5. P. 284–289.
21. Krieger I.M., Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres // *Transaction of Society of Rheology*. 1959. Vol. 3. P. 137–148.
22. Camargo I.L., Mateus Mota Morais M.M. et al. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 11906–11921.
23. Jie T., Xiaotian G., Haotian Ch. et al. The preparation of SiC ceramic photosensitive slurry for rapid stereolithography // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. Is. 5. P. 10115–10126.
24. Guojiao D., Rujie H., Keqiang Zh. et al. Stereolithography 3D printing of SiC ceramic with potential for lightweight optical mirror // *Ceramic International*. 2020. Vol. 46. Is. 11. P. 18785–18790.
25. Kihm H., Yang H.S. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope // *Optical Engineering*. 2013. Vol. 52. Is. 9. P. 1239–1246.
26. Xing H., Zou B., Li Sh. 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. Is. 18. P. 16340–16347.
27. Sun J., Huang C., Wang J. et al. Mechanical properties and microstructure of $\text{ZrO}_2\text{-TiN-Al}_2\text{O}_3$ composite ceramics // *Materials Science and Engineering*. 2006. Vol. 416. Is. 1. P. 104–108.
28. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
29. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
30. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
31. Kablov E.N., Karachevtsev F.N., Shilov A.L. et al. Thermodynamics and vaporization of ceramics based on the $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ and $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ systems studied by kems // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 908. P. 164575.
32. 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.

References

1. Scheithauer U., Schwarzer E., Richter H.-J. et al. Thermoplastic 3D Printing – An Additive Manufacturing Method for Producing Dense Ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2014, vol. 12, is. 1, pp. 1–6.
2. Zhangwei Ch., Ziyong Li, Junjie Li et al. 3D printing of ceramics: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 661–687.
3. Deckers J., Vleugels J., Kruth J.-P. Additive Manufacturing of Ceramics: a review. *Journal of Ceramic Science Technology*, 2014, vol. 04, is. 05, pp. 245–260.
4. Gibson J., Rosen D., Stacker B. *Technology of additive manufacturing. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Moscow: Technosfera, 2016, 83 p.
5. Kruglov D.V., Pavlyukova N.L. Advantages and disadvantages of additive technologies. *Energy-2019*, 2019, vol. 4, pp. 65–66.
6. Williams C.B. *Design and development of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure*: Dissertation. Georgia Institute of Technology, 2008, 390 p.
7. Abouliatim Y., Chartier T., Abelard P. et al. Optical characterization of stereolithography alumina suspensions using the Kubelka–Munk model. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, vol. 29, is. 5, pp. 919–924.
8. Badev A., Abouliatim Y., Chartier T. et al. Photopolymerization kinetics of a polyether acrylate in the presence of ceramic fillers used in stereolithography. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2011, vol. 222, is. 1, pp. 117–122.
9. Smirnov A.V., Chugunov S.S., Tikhonov A.A. Development and research of methods for additive production of BaTiO₃ ceramics using laser stereolithography processes. *Perspective technologies and materials: materials of scientific and practical. conf. with international participation*. Sevastopol: Sevastopol State Univ., 2020, pp. 182–185.
10. Santoliquido O., Camerota F., Rosa A. et al. A novel device to simply 3D print bulk green ceramic components by stereolithography employing viscous slurries. *Open Ceramics*, 2021, vol. 5, p. 100089.
11. Bae C.-J., Halloran J.W. Concentrated suspension-based additive manufacturing – viscosity, packing density, and segregation. *Journal of European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 4299–4306.
12. Xing H., Zou B., Lai Q. et al. Preparation and characterization of UV curable Al₂O₃ suspensions applying for stereolithography 3D printing ceramic microcomponent. *Powder Technology*, 2018, vol. 338, pp. 153–161.
13. Xing H., Zou B., Liu X. et al. Effect of particle size distribution on the preparation of ZTA ceramic paste applying for stereolithography 3D printing. *Powder Technology*, 2020, vol. 359, pp. 314–322.
14. Griffith M.L., Halloran J.W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography. *Journal of American Ceramic Society*, 1996, vol. 79, pp. 2601–2608.
15. Wang Z., Huang C., Wang J. et al. Development of a novel aqueous hydroxyapatite suspension for stereolithography applied to bone tissue engineering. *Ceramic International*, 2019, vol. 45, pp. 3902–3909.
16. Zhang S., Sha N., Zhao Z. Surface modification of α -Al₂O₃ with dicarboxylic acids for the preparation of UV-curable ceramic suspensions. *Journal of European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, pp. 1607–1616.
17. Deckers J., Wlugels J., Root J.-P. Additive manufacturing of ceramics: a review. *Ceramic Science and Technology*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 245–260.
18. Klocke F., Derichs C., Ader C. et al. Investigations on laser sintering of ceramic slurries. *Production Engineering*, 2007, vol. 1, is. 3, pp. 279–284.
19. Travitzky N., Bonet A., Dermeik B. et al. Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 2014, vol. 16, is. 6, pp. 729–754.
20. Tang H.H. Direct laser fusion to form ceramic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, vol. 8, is. 5, pp. 284–289.
21. Krieger I.M., Dougherty T.J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transaction of Society of Rheology*, 1959, vol. 3, pp. 137–148.

22. Camargo I.L., Mateus Mota Morais M.M. et al. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 11906–11921.
23. Jie T., Xiaotian G., Haotian Ch. et al. The preparation of SiC ceramic photosensitive slurry for rapid stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, is. 5, pp. 10115–10126.
24. Guojiao D., Rujie H., Keqiang Zh. et al. Stereolithography 3D printing of SiC ceramic with potential for lightweight optical mirror. *Ceramic International*, 2020, vol. 46, is. 11, pp. 18785–18790.
25. Kihm H., Yang H.S. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, is. 9, pp. 1239–1246.
26. Xing H., Zou B., Li Sh. et al. Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO₂ ceramic components by laser scanning stereolithography. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, is. 18, pp. 16340–16347.
27. Sun J., Huang C., Wang J. et al. Mechanical properties and microstructure of ZrO₂-TiN-Al₂O₃ composite ceramics. *Materials Science and Engineering*, 2006, vol. 416, is. 1, pp. 104–108.
28. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Sorokin O.Yu. Ceramic materials aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
29. Kuznetsov B.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Osin I.V. Synthesis of model high-temperature ceramic matrices by the method of spark plasma sintering and the study of their properties for the production of composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
30. Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 06, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
31. Kablov E.N., Karachevtsev F.N., Shilov A.L. et al. Thermodynamics and vaporization of ceramics based on the Gd₂O₃-ZrO₂ and Gd₂O₃-HfO₂ systems studied by kems. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 908, pp. 164575.
32. 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.

Информация об авторах

Турченко Максим Витальевич, техник, 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

Беляченко Иван Олегович, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Прокофьев Владимир Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Ivan O. Belyachenkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir A. Prokofev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.03.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.04.2023.

The article was submitted 23.03.2023; approved and accepted for publication after reviewing 03.04.2023.