

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ (FDM) ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

М.В. Турченко¹, Ю.Е. Лебедева¹, А.Ю. Колмогоров¹, Д.А. Гуров¹, А.С. Чайникова¹

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

Аннотация. При получении керамических изделий сложной формы традиционные методы не могут конкурировать с методами аддитивного производства. Это обусловлено как сложностью изготовления пресс-форм и литьевых форм, так и необходимостью последующей механической обработки, которая значительно усложняет и удорожает процесс получения изделия. Рассмотрена технология послойного наплавления (FDM), приведены ее основные преимущества и недостатки. Представлены результаты получения керамополимерного филамента и изделий из него при помощи технологии FDM.

Ключевые слова: FDM-технология, керамический филамент, керамическое аддитивное производство, оксид алюминия, диоксид циркония

Для цитирования: 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). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.

Scientific article

POSSIBILITY OF USING LAYER-BY-LAYER DEPOSITION TECHNOLOGY (FDM) TO PRODUCE CERAMIC PRODUCTS

M.V. Turchenko¹, Yu.E. Lebedeva¹, A.Yu. Kolmogorov¹, D.A. Gurov¹, A.S. Chainikova¹

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

Abstract. When producing ceramic products with complex shapes, traditional methods cannot compete with additive manufacturing methods. This is due to both the complexity of manufacturing molds and injection molds, and the need for subsequent mechanical processing, which significantly complicates and increases the cost of the process of obtaining a product. This article discusses the layer-by-layer deposition technology (FDM). Its main advantages and disadvantages are given. The results of producing ceramic polymer filament and products made from it using FDM technology are presented.

Keywords: FDM technology, ceramic filament, ceramic additive manufacturing, aluminum oxide, zirconium dioxide

For citation: 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), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.

Введение

Традиционные методы производства керамики (холодное изостатическое прессование, горячее прессование, искровое плазменное спекание, шликерное литье и др.) не способны обеспечить получение керамического изделия сложной формы [1–6]. Это обусловлено в первую очередь сложностью и длительностью технологического процесса традиционного керамического производства, который заключается как в изготовлении пресс-форм, так и в сложности последующей механической обработки керамики после получения заготовки. Кроме того, механическая обработка (шлифование, резание, сверление, полирование) не только существенно увеличивает стоимость изделия, но также и длительность его изготовления [7–9].

Текущие потребности в керамических изделиях сложной формы во многих отраслях промышленности (авиационной, химической, электронной, машиностроительной) привели к созданию новых, инновационных методов, называемых аддитивным производством. Аддитивное производство позволяет исключить из технологического цикла производства керамики стадию механической обработки и получать керамические изделия любой геометрической формы, а также дает возможность регулирования получаемых свойств и структуры [10–15].

Методы аддитивного производства принято разделять на прямые и непрямые способы в зависимости от того, возможно ли получить после печати изделия, готовые к эксплуатации. В отличие от тех же металлов, керамику (в особенности с плотностью, близкой к теоретической) получить прямым аддитивным производством достаточно сложно [16]. Причиной этому служит высокая температура плавления керамики и низкая скорость диффузии при спекании и уплотнении. Непрямые способы аддитивного производства позволяют изготавливать «сырые» керамические изделия, после получения которых необходимо проводить последующие операции: сушку, выжигание связующего, спекание. Изделия, полученные при помощи непрямого аддитивного производства, должны отвечать основным требованиям однородности, высокой плотности и точности размеров, что в сочетании с возможностью изготовления изделия любой формы является значительным преимуществом по сравнению с получением изделий с использованием традиционных методов керамического производства.

Следует обратить внимание на вид материала, используемого в керамическом аддитивном производстве. В отличие от получения полимеров или металлов, керамику невозможно применять в аддитивном производстве в виде сухого порошка. Это обусловлено невозможностью и нецелесообразностью плавления керамического порошка при температурах >1500 °C [17]. Материал для керамического аддитивного производства в зависимости от применяемой технологии, как правило, используется в виде пасты, суспензии или керамополимерной проволоки. Паста состоит из керамического порошка и связующего, проволока – из керамического порошка и термопластичного полимера [18–21]. Качество исходного керамического порошка оказывает влияние на характеристики всего изделия.

В данной статье рассмотрены возможность реализации аддитивного производства керамики по технологии послойного наплавления (FDM), а также способы получения керамополимерного филамента и керамических изделий различной сложности из него.

Технология послойного наплавления (FDM)

В настоящее время известными технологиями керамического аддитивного производства являются лазерная стереолитография (SLA), послойное наплавление (FDM), обработка светом (DLP), метод впрыска связующего (BJ), двухфотонная

полимеризация (TPP) и другие [22–24]. Самыми распространенными технологиями керамического производства являются SLA и FDM. Их активное применение связано с тем, что одна технология (FDM) является простой и дешевой, а другая (SLA) обладает высочайшим качеством печати, но очень высокой стоимостью как оборудования, так и материала. Технология послойного наплавления (FDM) позволяет получать керамику из всех соединений, в отличие от технологии SLA, в которой возможность печати тем или иным материалом зависит от степени его светопропускания. Это обусловлено тем, что засвечивание слоя при 3D-печати по данной технологии происходит под воздействием ультрафиолетового излучения с длиной волны 300–420 нм. В связи с этим печать карбидной или нитридной керамики существенно затруднена по технологии лазерной стереолитографии (SLA) в отличие от послойного наплавления (FDM).

Согласно данным научного портала Science Direct, интерес исследователей со всего мира к данному методу при получении керамических материалов за последние пять лет (2019–2023 гг.) значительно возрос, что подтверждается увеличением количества цитирований «FDM of ceramics» в научных статьях (рис. 1).

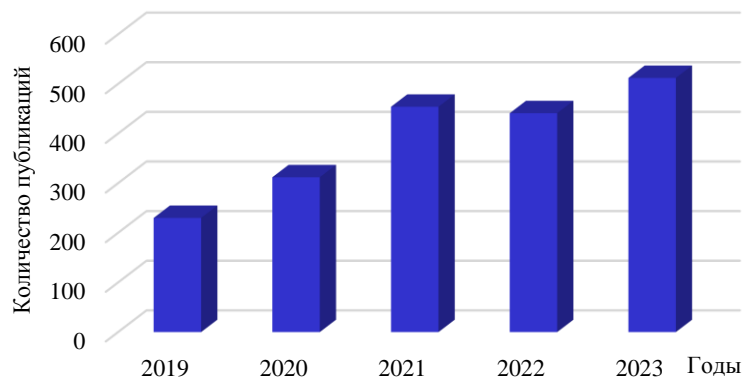


Рис. 1. Количество научных публикаций «FDM of ceramics» на портале Science Direct

Принцип действия FDM-технологии заключается в послойном наплавлении филамента на печатную платформу по заранее подготовленной CAD-модели.

Филамент представляет собой нить различного диаметра в зависимости от диаметра сопла, через которое подается материал в процессе печати. Филамент состоит из керамического порошка, термопластичного полимера, диспергирующих и смачивающих компонентов. К существенному недостатку FDM-технологии можно отнести низкую точность печати по сравнению с той же SLA-технологией. Но подготовка качественного материала (в данном случае – филамента), а также подбор оптимальных параметров печати и режимов последующей термической обработки позволяют получать изделия надлежащего качества с хорошим уровнем свойств.

Способы получения керамополимерного филамента и керамики из него при помощи технологии FDM

Количество керамической составляющей в филаменте напрямую влияет на свойства будущего изделия. Например, при высоком содержании оксида алюминия (>70 % (объемн.)) филамент будет неоднородным и иметь большое количество дефектов, а также обладать существенной хрупкостью. При небольшом содержании оксида алюминия (<40 % (объемн.)) наблюдается улучшение качества получаемого филамента, но при этом происходит снижение значений механических свойств. Для получения

изделия с высокими физико-механическими свойствами необходимо подбирать такое количество керамической и полимерной составляющих, чтобы филамент не был слишком хрупок и обладал одинаковой формой сечения по всей длине. Помимо регулирования состава филамента, необходимо подобрать оптимальные параметры 3D-печати – скорость печати, температуру экструдера и толщину слоя, которые оказывают существенное влияние на конечные свойства керамического изделия.

В работе [25] рассмотрена возможность получения алюмооксидной керамики при помощи технологии послойного наплавления (FDM). Для реализации данной технологии получен керамополимерный филамент, состоящий из порошка оксида алюминия со средним размером частиц 40 мкм и порошка полилактида (PLA) со средним размером частиц 35 мкм. Из полученной смеси, содержащей 50 % (по массе) оксида алюминия, на специальной машине для горячей запрессовки образцов изготавливали гранулы на протяжении 45 мин при температуре 185 °С и давлении 175 ат (17,5 МПа). Далее гранулы помещали в специальный бункер настольного экструдера при температуре 220 °С, из которого получали филамент. Из полученного филамента на 3D-принтере методом FDM-печати получали образцы при следующих технологических параметрах: температура экструдера 210 °С, диаметр сопла 0,8 мм, скорость печати 10 мм/с, высота слоя 0,4 мм, заполнение 100 %. Геометрические параметры полученных образцов соответствовали типу 1В по стандарту ISO 527-2:2012. Проведенное в данной работе исследование показало возможность получения керамических изделий по FDM-технологии, но при этом выявлены следующие проблемы: снижение механических свойств из-за образования агломератов керамической составляющей, а также появление дефектов (воздушные карманы, поры) на самих образцах, что обусловлено неверным выбором технологических параметров 3D-печати. Для решения данных проблем необходимо усовершенствовать способ получения филамента, а также скорректировать технологические параметры 3D-печати.

В работах [26, 27] для получения керамополимерной смеси и последующего изготовления филамента из нее предложено следующее соотношение компонентов в исходной смеси: 60 % (объемн.) оксида алюминия и 40 % (объемн.) полилактида (PLA). Приготовление смеси происходило на планетарной мельнице. Экструдирование филамента осуществляли при помощи настольного экструдера при температуре 220 °С и скорости 1,44 мм/с. Предложенное соотношение керамической и полимерной составляющих позволило получить керамополимерный филамент, который может применяться для 3D-печати по технологии послойного наплавления (FDM). Исследование микроструктуры филамента показало равномерное распределение частиц оксида алюминия (рис. 2, а). Полученная карта распределения алюминия (рис. 3, б), углерода (рис. 3, в) и кислорода (рис. 3, г) также подтвердила полимерную С–О-основу филамента.

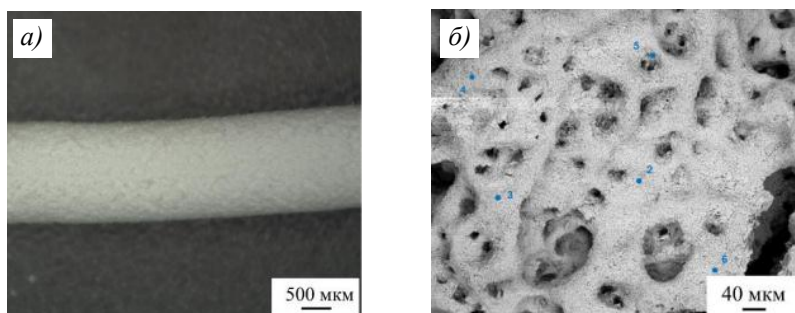


Рис. 2. Структура керамополимерного филамента: а – оптическая микроскопия; б – сканирующая электронная микроскопия

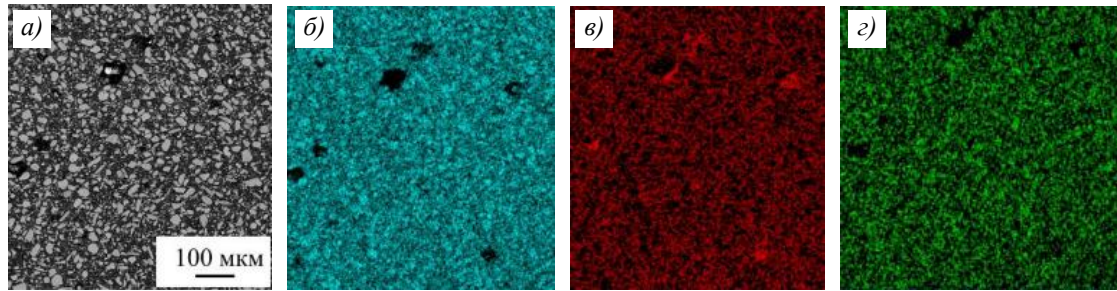


Рис. 3. Микроструктура филамента (60 % (объемн.) Al_2O_3 + 40 % (объемн.) PLA): *a* – сканирующая электронная микроскопия; *б* – распределение алюминия; *в* – распределение углерода; *г* – распределение кислорода

В работе [28] получена плотная керамика на основе Si_3N_4 методом послойного наплавления (FDM). В качестве материала использовали керамополимерный филамент, содержащий керамический порошок Si_3N_4 со средним размером частиц 0,69 мкм и органическое связующее (сополимер этилена, винилацетата и полиэтилена). Получение керамополимерного филамента осуществляли следующим образом: в специальном подогреваемом цилиндре смешивали керамический порошок и связующее. Полученную керамополимерную массу подавали через экструдер. Для исключения образования агломератов и отсутствия сегментации порошка, в цилиндре размещался винт, который смешивал керамический порошок и органическое связующее. В данной работе применение FDM-технологии позволило избежать проблем рассеивания ультрафиолетового излучения, характерных для метода лазерной стереолитографии (SLA).

В работе [29] получен керамополимерный филамент для последующей 3D-печати керамики по FDM-технологии. Состав керамополимерного филамента включал: 40 % (по массе) полиамида, 15 % (по массе) диоксида циркония и 30 % (по массе) β -ТСР (трикальцийфосфат). Для получения однородной керамополимерной смеси каждый из этих компонентов смешивали при помощи двухшнекового экструдера, а затем гранулировали. Полученные гранулы подвергали экструдированию с целью образования однородного керамополимерного филамента диаметром 1,65–1,85 мм. Предложенное исходное соотношение компонентов позволило получить однородный керамополимерный филамент, из которого по FDM-технологии получены образцы, обладающие следующими характеристиками: предел прочности при изгибе 29,06 МПа, модуль упругости при изгибе 585 МПа, шероховатость поверхности 7,33 мм.

В работе [30] получен композит из алюминия и карбида кремния с использованием 3D-печати по технологии FDM. В качестве исходного материала изготовлен филамент, который состоял из следующих компонентов: порошок сплава Al 6061, порошок SiC (объемное соотношение Al и SiC составляло 3:7) и органическое связующее (полиэтилен высокого давления (ПЭВП), стеариновая кислота, парафин, этиленвинилацетат (ЭВА)). Получение филамента осуществляли за счет смешивания порошка Al, SiC и органического связующего с последующим гранулированием. Полученные гранулы помещали в специальный подогреваемый резервуар, из которого они поступали в экструдер 3D-принтера. Полученные при помощи 3D-печати по технологии FDM образцы представляли собой небольшие прямоугольные плитки (60×40×20 мм). Напечатанные образцы подвергали термической обработке для удаления связующего, а затем спекали. Исследование структуры полученных после 3D-печати образцов показало хорошую связь между Al, SiC и связующим (рис. 4, *a*). Исследование структуры образцов после отжига показало, что большая часть Al сохраняет морфологию исходного материала, а его расплавленная часть обеспечивает силу сцепления, придающую

напечатанному изделию, не подверженному термическому удалению связующего, достаточную прочность – порядка 80 МПа (рис. 4, б). Полученные после спекания образцы обладали следующими значениями характеристик: прочность при изгибе 211 МПа, теплопроводность 112 Вт/(м·К), коэффициент линейного теплового расширения $8,671 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

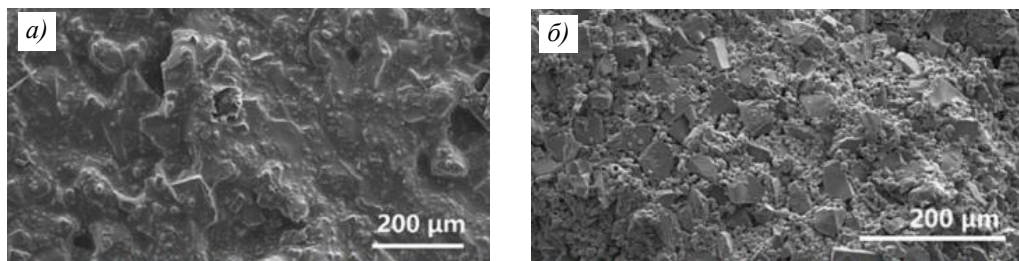


Рис. 4. Микроструктура полученных образцов по FDM-технологии после 3D-печати (а) и удаления связующего (б)

В работе [31] методом послойного наплавления (FDM) получена плотная циркониевая керамика. В качестве материала использовали филамент, содержащий порошок диоксида циркония с 3 % (мольн.) Y_2O_3 со средним размером частиц 0,5 мкм, а также органическое связующее, включающее 25 % (по массе) сополимера этилена и винилацетата, 20 % (по массе) полиэтилена, 50 % (по массе) парафина и 5 % (по массе) стеариновой кислоты. Содержание порошка диоксида циркония составило 85 % (по массе). Смешивание твердого вещества и органического связующего проводили при помощи двойного валика при температуре 140–150 °С в течение 40–50 мин с последующим охлаждением до комнатной температуры. Полученную массу загружали в подогреваемый шнековый бак. Нагретая масса спускалась при помощи специального винта в экструдер, который в свою очередь наносил слой материала согласно заранее подготовленной программе. Из полученного керамополимерного филамента изготовлены керамические образцы прямоугольной формы (60×7×6 мм). Для печати выбрали следующие технологические параметры: температура экструдера – от 130 до 190 °С с шагом 30 °С для каждого из образцов; плотность заполнения 100 % (прямоугольный вид заполнения); толщина слоя 0,15 мм; скорость печати 30 мм/с (рис. 5).

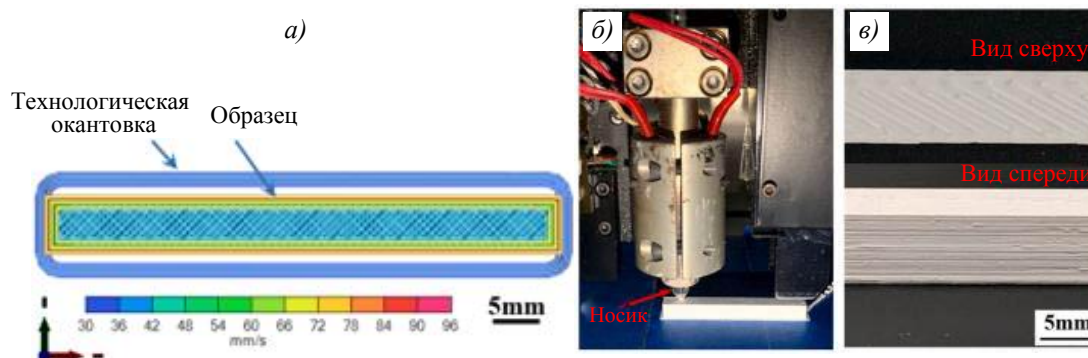


Рис. 5. 3D-печать образца ZrO_2 : а – разделение 3D-модели на слои; б – процесс печати; в – полученный образец

Для удаления связующего из керамических образцов использован керосин. Процесс удаления связующего включал окунание в предварительно нагретый до 50 °С керосин в течение суток с последующей сушкой при температуре 45 °С. Для окончательного

удаления связующего образцы помещали в печь и сначала нагревали до 200 °С, а затем – до 600 °С, выдерживали при заданной температуре ~30 мин. После термического удаления связующего образцы спекали в печи при температуре 1500 °С в течение 2 ч при скорости нагрева 2,5 °С/мин.

За счет получения керамических образцов при различных температурах стало возможным определить оптимальную температуру экструдера, обеспечивающую выдавливание филамента одинаковой формы на всем протяжении 3D-печати. Оптимальная температура экструдера напрямую влияет на качество получаемых изделий по FDM-технологии. При печати с недостаточно нагретым экструдером возникает множество дефектов – например, в процессе нанесения слоя он имеет разную толщину, что недопустимо для получения качественного изделия. В частности, в данной работе при температуре экструдера 190 °С получены образцы, дефекты которых минимальны и оказывают незначительное влияние на конечные свойства образцов. Помимо температуры экструдера, важным параметром печати является диаметр сопла, из которого подается филамент. В данной работе рекомендуется использовать сопло диаметром 0,15 мм.

Полученные образцы из ZrO_2 обладали следующими характеристиками: прочность при изгибе 30 МПа, плотность 6 г/см³. Достигнутый в данной работе результат позволяет получать керамические изделия любой сложности при минимальном количестве дефектов.

В работе [32] получена плотная керамика на основе ZrO_2 по технологии FDM с относительной плотностью 99,1 % и прочностью при изгибе 492,8±40 МПа. Филамент получен из порошка диоксида циркония (43 % (объемн.)) и термопластичного связующего, состоящего из этилен-бутилен-стирола. Полученные FDM-способом образцы подвергали отжигу для удаления связующего, а затем спекали для получения плотной керамики. Проведенный микроструктурный анализ выявил дефекты межслоевого соединения размером ~1 мкм, а также наличие пустот размером ~10 мкм в месте соединения слоев. Подобные дефекты характерны не только для циркониевой керамики, но и любой керамики, полученной данным способом. Это обусловлено тем, что в процессе 3D-печати по технологии FDM экструдер наносит слой пасты на предыдущий слой, который в свою очередь по определенным причинам (например, из-за неправильных температурных условий в рабочей камере 3D-принтера) может не успеть остыть или деформироваться под массой наносимого на него следующего слоя.

В работе [33] материал для реализации FDM-технологии представляет собой керамическую пасту, состоящую из 85 % (по массе) оксида алюминия и 15 % (по массе) парафина, который служит технологической связкой, обеспечивающей соединение керамических частиц между собой в процессе 3D-печати. Данный способ является одной из разновидностей FDM-технологии, в которой подаваемый из экструдера материал представляет собой пастообразную массу, т. е. способ подачи материала идентичен FDM-технологии, в которой в качестве подаваемого материала используется филамент, состоящий из керамического порошка и специальной связки. Авторы данной работы обеспечили снижение температуры спекания напечатанного «сырого» образца из оксида алюминия путем нанесения оболочки из комбинации соединений $MnAl_2O_4/TiO_2$ на зерна Al_2O_3 . Нанесение подобной комбинации оболочки на зерна оксида алюминия позволило снизить температуру спекания с 1700 до 1310 °С. Полученный после 3D-печати «сырой» образец не имел визуально различимых отличий от заготовок, которые получают традиционными методами шликерного литья (рис. 6, а).

Для придания необходимых свойств полученный после 3D-печати «сырой» образец подвергали нескольким дополнительным операциям: сушке, удалению парафина

и последующему спеканию. Удаление технологической связки из керамического «сырого» образца осуществляли путем медленного нагрева при температуре до 200 °С со скоростью нагрева 3 °С/ч в засыпке из порошка силикагеля (рис. 6, б). Спекание проводили при температуре 1310 °С. Полученные керамические образцы обладали следующими свойствами: пористость 21 %, кажущаяся плотность 3,14 г/см³, твердость 14–17 ГПа (рис. 6, в). Следует отметить также, что нанесение оболочки из комбинации соединений MnAl₂O₄/TiO₂ на зерна оксида алюминия привело к увеличению размера зерен в 10 раз: «сырой» образец – $d_{\text{ср}} = 2,4$ мкм, спеченный образец – $d_{\text{ср}} = 21,3$ мкм (рис. 7).

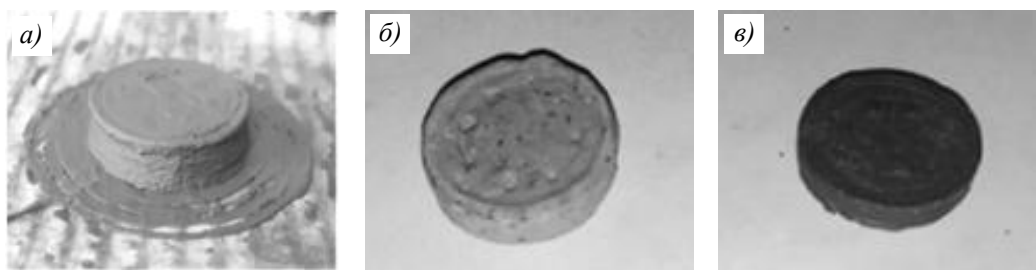


Рис. 6. Полученный по FDM-технологии образец Al₂O₃: а – «сырая» заготовка; б – образец после удаления связующего; в – образец после спекания

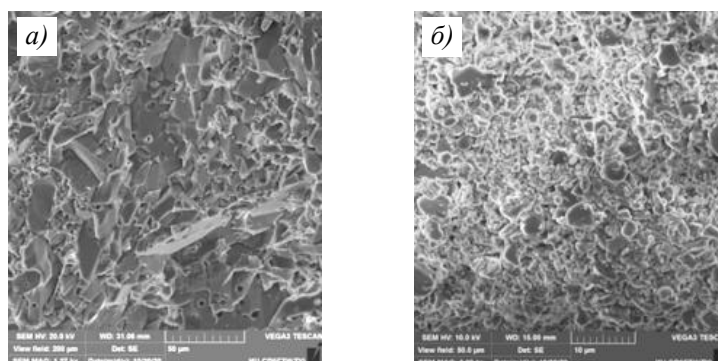


Рис. 7. Микроструктура образцов Al₂O₃: а – «сырая» заготовка; б – образец после спекания

В работе [34] из оксида алюминия по технологии послойного наплавления (FDM) получены образцы в форме балочек для последующего исследования линейной усадки после термической обработки. Для 3D-печати использован филамент, состоящий, % (по массе), из 80 оксида алюминия, 15 PETG-пластика (полиэтилентерефталат-гликоль), 3 органического стекла РММА (полиметилметакрилат) и 2 поверхностно-активного вещества (Loxiol G20). Полученные после 3D-печати образцы подвергали обжигу для удаления связующего при температуре 1100 °С, после чего проводили их спекание при температуре 1600 °С. После спекания образцы растрескались. На полученных образцах исследована линейная усадка, которая составляла 15 %. Растрескивание образцов вызвано некорректным режимом обжига и последующего спекания.

В работе [35] приведен способ получения алюмооксидной керамики при помощи FDM-технологии. В качестве исходного керамического материала использован порошок оксида алюминия (50 % (объемн.)) со средним размером частиц 7 мкм. Для скрепления керамических частиц между собой использован поливиниловый спирт (3 % (объемн.)). Для получения однородной суспензии при смешивании порошка оксида алюминия и связующего дополнительно вводили цитрат аммония (0,4 % (объемн.)) и глицерин (2,3 % (объемн.)) в качестве диспергатора. Все компоненты смешивали в шаровой

мельнице с добавлением дистиллированной воды (45 % (объемн.)) до момента получения однородной суспензии, которую загружали в специальный модуль шнекового экструдера для выдавливания смеси через сопло диаметром 1 мм. Полученные FDM-методом образцы представляли собой прямоугольные бруски, которые после печати подвергали термическому воздействию для удаления связующего: нагревали до 550 °С и выдерживали некоторое время, а затем – до 800 °С. Для получения плотных образцов из оксида алюминия их спекали в печи при температуре 1700 °С в течение 2 ч. Температура спекания не должна превышать 1700 °С, иначе это приведет к тому, что керамические частицы в процессе спекания перейдут в жидкую фазу. При более низкой температуре спекания оксида алюминия (<1500 °С) керамические частицы спекаются не полностью, что приводит к снижению плотности образца.

Получение изделий из карбидной керамики – сложная задача для традиционных методов из-за высокой температуры спекания подобных материалов (>2000 °С), высокой твердости данного класса материалов и, как следствие, плохой механической обрабатываемости. Но FDM-технология позволяет получать подобную керамику с относительной плотностью >95 %. Так, в работе [36] получена керамика из карбида бора. Филамент для 3D-печати состоял из 65 % (по массе) порошка карбида бора со средним размером частиц 1 мкм, диспергированного в термопластичном связующем. Диаметр сопла экструдера в процессе печати составлял 0,4 мм. Полученный образец подвергали отжигу при температуре не более 140 °С с целью не допустить термического разложения связующего. Спекание отожженного образца позволило получить керамику на основе карбида бора с относительной плотностью 96 % и твердостью 29,88±1,27 ГПа.

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

Заключения

Показана возможность получения керамических изделий при помощи метода послойного наплавления (FDM). Данная технология открывает возможности получения любых видов керамики при небольших затратах как на получение исходного материала для печати, так и на все изделие в целом благодаря низкой стоимости оборудования и исходных материалов по сравнению с другими методами керамического аддитивного производства.

Приведенные в статье варианты 3D-печати по технологии FDM позволяют получить бездефектное изделие любой сложности с необходимым уровнем свойств при правильном подборе термопластичного связующего, диспергирующих добавок, режимов получения филаментов, режимов FDM-печати и выжигания связующего. Показана возможность варьирования тех или иных параметров получения филаментов и печати, за счет чего можно регулировать свойства полученного изделия.

Список источников

1. Молодин В.И., Мыльникова Л.Н. Теория и практика исследования древней керамики: традиционные и новейшие методы // Самарский научный вестник 2015. № 3 (12). С. 122–127.
2. 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: 02.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
3. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Металлург. 2013. № 12. С. 4–8.
4. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
5. Андриянов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В. и др. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов / под ред. И.Я. Гузмана. М.: Стройматериалы, 2012. 496 с.

6. Семериков И.С., Герасимова Е.С. Физическая химия. Строительные материалы: учеб. пособие для вузов, Москва: Юрайт; Екатеринбург: Из-во Урал. ун-та, 2018. 204 с.
7. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 20–24.
8. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
9. Горелов В.А., Алексеев С.В. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. № 2. С. 64–67.
10. 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.
11. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 131–141.
12. Ильющенко А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: мат. Междунар. науч.-техн. конф. (14–16 сент. 2022 г., г. Минск). Минск: Белорусская наука, 2022. С. 17–34.
13. Черепанова М.В., Сквородников П.В., Хазеев А.А. Применение аддитивных технологий в производстве керамических изделий сложных форм // Научный альманах. 2018. № 10 (2). С. 73–76.
14. Lakhdar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. Additive manufacturing of advanced ceramic materials // Progress in Materials Science. 2021. Vol. 116. P. 736–742.
15. Travitzky N., Bonet A., Dermeik B. et al. Additive manufacturing of ceramic based materials // Advanced engineering materials. 2014. Vol. 16. No. 6. P. 729–754.
16. Крашенинников М.А. Особенности аддитивных технологий конструирования изделий // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. статей. Самара: Самарск. гос. арх.-техн. ун-т, 2017. С. 98–102.
17. Истомин А.В. Исследование распределения нанопорошка оксида алюминия в полимерном растворе // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-78-88.
18. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
19. Соколов А.В., Дейнега Г.И., Кузьмина Н.А. Влияние добавки Sc_2O_3 на температуру спекания и свойства оксидной керамики системы $ZrO_2-Y_2O_3$ // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
20. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н. и др. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона. 2016. Т. 43. № 4 (43). С. 123.
22. Муртазина С.А. Современные технологии производства и разновидности керамических изделий // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 13. С. 135–137.
23. Долгин А.С., Богданов С.П., Макогон А.И. 3D-печать корундовыми пастами // Функциональные материалы: синтез, свойства, применение: сб. тез. XIX Всерос. молодеж. науч. конф. (01–03 дек. 2020 г., г. Санкт-Петербург). СПб.: ЛЕМА, 2020. С. 147–148.
24. Питерсков П.П., Побирохин Г.С. 3D-печать керамикой. Область применения. Методы // Сб. тр. VII Конгресса молодых ученых (17–20 апр. 2018 г., г. Санкт-Петербург). СПб.: Санкт-Петербург. нац. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2018. С. 168–171.

25. Смирнов А., Кузнецова Е.В., Хмыров Р.С. и др. Исследование механических свойств при растяжении керамополимерных композитов, полученных методом послойного наплавления // Перспективные технологии и материалы: мат. Междунар. науч.-практ. конф. (21–23 сент. 2022 г., г. Севастополь). Севастополь: Севастопольск. гос. ун-т, 2022. С. 199–202.
26. Смирнов А., Кузнецова Е.В., Подрабинник Н.Н. и др. Изготовление филамента на основе оксида алюминия и полилактида для 3D-печати объектов сложной геометрии // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. VIII Междунар. науч. конф. (30–31 авг. 2021 г., г. Казань). Казань: Конверт, 2021. С. 45.
27. Смирнов А., Кузнецова Е.В., Подрабинник Н.Н. и др. Разработка и исследование керамополимерного филамента для 3D-печати методом послойного наплавления // Перспективные технологии и материалы: мат. Междунар. науч.-практ. конф. (06–08 окт. 2021 г., г. Севастополь). Севастополь: Севастопольск. гос. ун-т, 2021. С. 228–232.
28. Furong N., Xiaole Y., Yuanbing L. et al. Fused deposition modeling of Si₃N₄ ceramics: A cost-effective 3D-printing route for dense and high performance non-oxide ceramic materials // Journal of the European Ceramic Society. 2022. Vol. 42. No. 15. P. 7369–7376.
29. Abdullah A., Noraihan T., Dasmawati M. et al. Mechanical and physical properties of highly ZrO₂/β-TCP filled polyamide 12 prepared via deposition modeling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application // Materials Letters. 2017. Vol. 189. P. 307–309.
30. Furrong N., Xiaole Y., Yuanbing L. et al. Fused deposition modeling of dense complex-shaped SiC_p/Al composites with excellent properties // Materials Letters. 2024. Vol. 364. P. 1363–1367.
31. He Q., Jiang J., Yang X. et al. Additive manufacturing of dense zirconia ceramics by fused deposition modeling via screw extrusion // Journal of the European Ceramic Society. 2021. Vol. 41. No. 1. P. 1033–1040.
32. Guan Z., Yang X., Liu P. et al. Additive manufacturing of zirconia ceramic by fused filament fabrication // Ceramics International. 2023. Vol. 49. No. 17. P. 27742–27749.
33. Гаршин А.П., Богданов С.П., Долгин А.С., Макагон А.И. Использование керамических паст, на основе порошков ядро-оболочка для 3D-печати // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 12-го Междунар. симпозиума (07–09 апр. 2021 г., г. Минск): в 2 ч. Минск: Белорусская наука, 2021. Ч. 1. С. 370–376.
34. Сагун А.И. Разработка термопластичного фидстока для 3D-печати из оксида алюминия // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых (26 фев. 2023 г., г. Новосибирск – Шерегеш) / под редакцией Е.И. Крауса. Новосибирск: Новосибирск. нац. исследовательск. гос. ун-т, 2023. С. 165–166.
35. Jinsong C., Enquan B., Dazhi H. et al. Extrusion Freeforming-Based 3D Printing of Ceramic Materials // Materials Transactions. 2020. Vol. 61. No. 11. P. 2236–2240.
36. Vozarova M., Neubauer E., Baca L. et al. Preparation of fully dense boron carbide ceramics by Fused Filament Fabrication (FFF) // Journal of the European Ceramic Society. 2023. Vol. 43. No. 5. P. 1751–1761.

References

1. Molodin V.I., Mylnikova L.N. Theory and practice of studying ancient ceramics: traditional and newest methods. *Samarskiy nauchnyy vestnik*, 2015, no. 3 (12), pp. 122–127.
2. 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: May July 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
3. Kablov E.N. No new materials – no future. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
4. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation equipment. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
5. Andrianov N.T., Balkevich V.L., Belyakov A.V. et al. *Chemical technology of ceramics*: textbook for universities. Ed. I.Ya. Guzman. Moscow: Stroymaterialy, 2012, 496 p.
6. Semerikov I.S., Gerasimova E.S. *Physical Chemistry. Construction Materials*: a textbook for universities, Moscow: URAYT; Ekaterinburg: Publ. House of the Ural. Univ., 2018, 204 p.

7. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Promising high-temperature ceramic composite materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 20–24.
8. Kablov E.N. *Trends and Guidelines for Innovative Development of Russia: collection of information materials*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
9. Gorelov V.A., Alekseev S.V. Features of mechanical processing of parts from ceramic materials. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*, 2012, no. 2, pp. 64–67.
10. 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.
11. Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. Application of additive technologies in construction and in the manufacture of ceramic products. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2020, no. 2, pp. 131–141.
12. Ilyushchenko A.F. Additive technologies and powder metallurgy. *New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding*: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. (September 14–16, 2022, Minsk). Minsk: Belarusian Science, 2022, pp. 17–34.
13. 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), pp. 73–76.
14. Lakhdar Y., Tuck C., Binner J., Terry A., Goodridge R. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 2021, vol. 116, pp. 736–742.
15. Travitzky N., Bonet A., Dermeik B. et al. Additive manufacturing of ceramic based materials. *Advanced engineering materials*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 729–754.
16. Krashennnikov M.A. Features of additive technologies for product design. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies: collection of articles*. Samara: Samara State arch.-tech. Univ, 2017, pp. 98–102.
17. Istomin A.V. Study of the distribution of aluminum oxide nanopowder in a polymer solution. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-78-88.
18. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
19. Sokolov A.V., Deynega G.I., Kuzmina N.A. Influence of Sc_2O_3 additive on sintering temperature and properties of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ system oxide ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 64–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-64-69.
20. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Goncharova O.N., Bereznoy Yu.M., Bessarabov E.N. et al. Additive technologies – a dynamically developing production. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2016, vol. 43, no. 4 (43), p. 123.
22. Murtazina S.A. Modern production technologies and types of ceramic products. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2015, vol. 18, no. 13, pp. 135–137.
23. Dolgin A.S., Bogdanov S.P., Makogon A.I. 3D printing with corundum pastes. *Functional materials: synthesis, properties, application*: collection of abstracts of the XIX All-Rus. youth scientific conf. (December 1–3, 2020, St. Petersburg). St. Petersburg: LEMA, 2020, pp. 147–148.
24. Piterskov P.P., Pobirokhin G.S. 3D printing with ceramics. Application area. Methods. Coll. proc. of the VII Congress of young scientists (April 17–20, 2018, St. Petersburg). SPb: St. Petersburg. National University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2018, pp. 168–171.
25. Smirnov A., Kuznetsova E.V., Khmyrov R.S. et al. Study of mechanical properties under tension of ceramic-polymer composites obtained by the method of layer-by-layer fusion deposition. *Advanced technologies and materials*: proc. Int. scientific-practical conf. (September 21–23, 2022, Sevastopol). Sevastopol: Sevastopol State Univ., 2022, pp. 199–202.

26. Smirnov A., Kuznetsova E.V., Podrabinnik N.N. et al. Production of filament based on aluminum oxide and polylactide for 3D printing of objects with complex geometry. *Priority areas of innovative activity in industry: Coll. Sci. Art. VIII Int. sci. conf.* (August 30–31, 2021, Kazan). Kazan: Konvert, 2021, p. 45.
27. Smirnov A., Kuznetsova E.V., Podrabinnik N.N. et al. Development and study of ceramic-polymer filament for 3D printing by the fused deposition method. *Advanced technologies and materials: Proc. Int. Sci. And Practical Conf.* (October 6–8, 2021, Sevastopol). Sevastopol: Sevastopol State Univ., 2021, pp. 228–232.
28. Furong N., Xiaole Y., Yuanbing L. et al. Fused deposition modeling of Si₃N₄ ceramics: A cost-effective 3D-printing route for dense and high performance non-oxide ceramic materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, vol. 42, no. 15, pp. 7369–7376.
29. Abdullah A., Noraihan T., Dasmawati M. et al. Mechanical and physical properties of highly ZrO₂/β-TCP filled polyamide 12 prepared via deposition modeling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application. *Materials Letters*. 2017, vol. 189, pp. 307–309.
30. Furrong N., Xiaole Y., Yuanbing L. et al. Fused deposition modeling of dense complex-shaped SiC_p/Al composites with excellent properties. *Materials Letters*. 2024, vol. 364, pp. 1363–1367.
31. He Q., Jiang J., Yang X. et al. Additive manufacturing of dense zirconia ceramics by fused deposition modeling via screw extrusion. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 1033–1040.
32. Guan Z., Yang X., Liu P. et al. Additive manufacturing of zirconia ceramic by fused filament fabrication. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, no. 17, pp. 27742–27749.
33. Garshin A.P., Bogdanov S.P., Dolgin A.S., Makagon A.I. Use of ceramic pastes based on core-shell powders for 3D printing. *Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding: Reports of the 12th Int. Symposium* (April 7–9, 2021, Minsk): in 2 parts. Minsk: Belarusian science, 2021, part 1, pp. 370–376.
34. Sagun A.I. Development of thermoplastic feedstock for 3D printing from aluminum oxide. *Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies: Reports. XVII All-Rus. conf. young scientists* (February 26, 2023, Novosibirsk – Sheregesh). Ed. E.I. Kraus. Novosibirsk: Novosibirsk National Research State Univ., 2023, pp. 165–166.
35. Jinsong C., Enquan B., Dazhi H. et al. Extrusion Freeforming-Based 3D Printing of Ceramic Materials. *Materials Transactions*, 2020, vol. 61, no. 11, pp. 2236–2240.
36. Vozarova M., Neubauer E., Baca L. et al. Preparation of fully dense boron carbide ceramics by Fused Filament Fabrication (FFF). *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, vol. 43, no. 5, pp. 1751–1761.

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
Колмогоров Андрей Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Гуров Дмитрий Александрович, заместитель начальника лаборатории по науке, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Чайникова Анна Сергеевна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., 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
Andrey Yu. Kolmogorov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Dmitry A. Gurov, Deputy Head of the Laboratory for Science, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Anna S. Chainikova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.08.2024.
 The article was submitted 23.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 01.08.2024.