

Научная статья

УДК 621.762

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-94-106

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГИДРОКСИАПАТИТА С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М.В. Турченко¹, Ю.Е. Лебедева¹, А.С. Чайникова¹, А.В. Бутузов¹,
М.В. Гамазина¹, К.И. Светогоров¹, С.В. Неруш¹

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

Аннотация. Подробно рассмотрены основные методы аддитивного производства (послойное наплавление, лазерная стереолитография, цифровая обработка светом, струйная печать), позволяющие получать трехмерные структуры со сложной архитектурой (скаффолды) на основе гидроксиапатита. Проведен анализ научно-технической информации в области 3D-печати керамики на основе гидроксиапатита с последующим применением в регенеративной медицине. Проведена оценка актуальности исследований в области получения биомедицинских изделий на основе гидроксиапатита с применением аддитивных технологий.

Ключевые слова: гидроксиапатит, керамика, лазерная стереолитография, послойное наплавление, цифровая обработка светом, струйная печать

Для цитирования: Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Чайникова А.С., Бутузов А.В., Гамазина М.В., Светогоров К.И., Неруш С.В. Получение изделий из гидроксиапатита с применением аддитивных технологий // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 94–106. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-94-106.

Scientific article

PRODUCTION OF HYDROXYAPATITE PRODUCTS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

M.V. Turchenko¹, Yu.E. Lebedeva¹, A.S. Chaynikova¹, A.V. Butuzov¹,
M.V. Gamazina¹, K.I. Svetogorov¹, S.V. Nerush¹

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

Abstract. This review describes in detail the main methods of additive manufacturing (FDM, CJP, SLA, DLP), which make it possible to obtain three-dimensional structures with complex architecture (scaffolds) based on hydroxyapatite. The analysis of scientific information in the field of 3D printing of ceramics based on hydroxyapatite with subsequent application in regenerative medicine is carried out. The relevance of research in the field of obtaining biomedical products based on hydroxyapatite using additive technologies has been assessed.

Keywords: hydroxyapatite, ceramics, laser stereolithography, layer-by-layer deposition, digital light processing, inkjet printing

For citation: Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Chaynikova A.S., Butuzov A.V., Gamazina M.V., Svetogorov K.I., Nerush S.V. Production of hydroxyapatite products using additive technologies. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 94–106. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-94-106.

Введение

Инженерия костных тканей стала инновационной и многообещающей стратегией лечения костных дефектов, согласно которой трехмерный пористый каркас, интегрированный в пораженный участок, выполняет функцию опорной базы для регенерации костных тканей естественным образом. За последние несколько десятилетий для изготовления тканевых конструкций, именуемых матрицами или скаффолдами, для инженерии костной ткани предложены и применены различные методы и материалы, включая биметаллы, биокерамику, биополимеры и биокompозиты. Однако сохранение требуемых свойств данных материалов при их применении остается сложной задачей [1–5]. Архитектура, механические свойства, остеогенная способность, возможность пролиферации, миграции и дифференцировки клеток считаются наиболее важными характеристиками для идеального скаффолда. Большое количество керамических материалов обладает высокой жесткостью и биоактивностью, т. е. сходством с естественной костью по химическому составу [6–11]. В связи с этим многие керамические материалы активно применяются в тканевой инженерии регенеративной медицины.

Последние несколько лет широкое применение в костной инженерии нашли синтетические керамические материалы, т. е. искусственные материалы, обладающие улучшенными свойствами по сравнению с натуральными. Помимо схожести свойств с человеческой костью, подобные материалы обладают повышенной безопасностью при применении, большей доступностью и меньшим количеством клинических ограничений [12]. Одним из наиболее широко применяемых синтетических материалов в регенеративной медицине костных тканей является гидроксипатит (ГА). В качестве основных преимуществ ГА можно выделить его биосовместимость, биоактивность, остеointегративность и остеопроводимость, а также большое сходство с химическим составом кости человека [13, 14]. Так, в работе [15] обнаружено, что 3D-матрицы из чистого ГА обладают исключительной биосовместимостью. В работе [16] показано, что 3D-печатные матрицы из ГА находят широкое применение в восстановлении костных дефектов, в качестве заполнителей костного пространства при дефектах пародонта, ушных, глазных и челюстно-лицевых дефектах. Однако ГА обладает низким уровнем механических свойств (повышенная хрупкость), что обуславливает необходимость разработки режимов его упрочнения или создания композитов на его основе. В работе [17] предложен способ, позволяющий уменьшить хрупкость структуры из чистого ГА за счет инфильтрации полимера после спекания. В этом случае полимер перекрывает трещины, образовавшиеся в напечатанных из ГА скаффолдах, тем самым увеличивая его механическую прочность.

Стремительное развитие инженерии костных тканей привело к острой потребности получения скаффолдов со сложной архитектурой и высокой функциональностью, обеспечивающей высокую скорость регенерации костных тканей [18, 19]. Традиционные методы изготовления подобных трехмерных структур, такие как выщелачивание частиц, вспенивание и сублимационная сушка, имеют существенные ограничения. Во-первых, получение скаффолдов со сложной архитектурой с помощью традиционных методов осложнено необходимостью оснастки [20]. Во-вторых, невозможность проведения точного контроля геометрических параметров и внутренней связанности пор существенно ограничивает применение традиционных методов. Поэтому для получения сложных скаффолдов на основе ГА активно применяют новые инновационные методы, такие как аддитивные технологии [21–23].

В настоящее время научные исследования по направлению 3D-печати керамики на основе ГА находятся на стадии интенсивного развития. По данным научно-технического портала ScienceDirect, за последние 10 лет (2015–2024 гг.) интерес исследователей к технологиям получения изделий из керамических материалов на основе ГА со сложной архитектурой и геометрической формой с использованием аддитивных методов значительно возрос, что подтверждается десятикратным увеличением количества публикаций

(рис. 1). Можно предположить, что с текущими темпами развития этой научной области данные показатели сохранят тенденцию эскалации еще долгие годы.

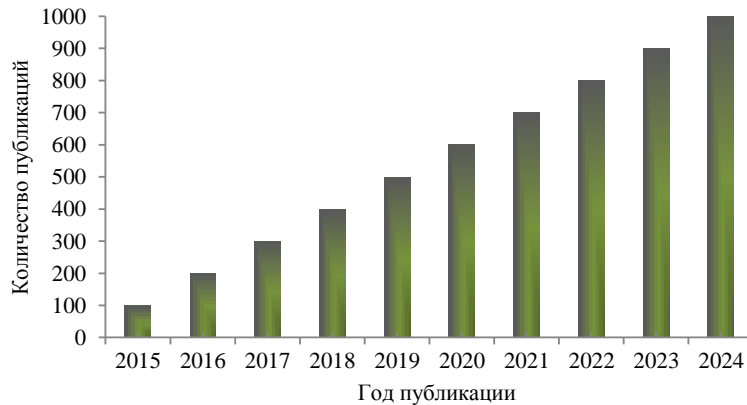


Рис. 1. Количество публикаций, по данным портала ScienceDirect, в области получения биомедицинских изделий на основе гидроксиапатита с применением аддитивных технологий

Согласно данным научно-технических публикаций, наиболее часто для биомедицинских применений используются следующие технологии 3D-печати: послойное наплавление (Fused deposition modeling – FDM), лазерная стереолитография (Stereolithography apparatus – SLA), цифровая обработка светом (Digital light processing – DLP), струйная печать (Color Jet Printing – CJP).

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Лазерная стереолитография

Лазерная стереолитография (SLA) – непрямой метод аддитивного производства. Данная технология обладает высоким разрешением и свободой печати. Это позволяет получать сложные структуры различных геометрических форм, которые могут применяться в биоинженерии для регенерации костных тканей. Принцип действия лазерной стереолитографии заключается в нанесении слоя керамической пасты на рабочую поверхность с последующим его отверждением по заданной траектории (рис. 2). Отверждение каждого слоя осуществляется под воздействием ультрафиолетового излучения (УФ).

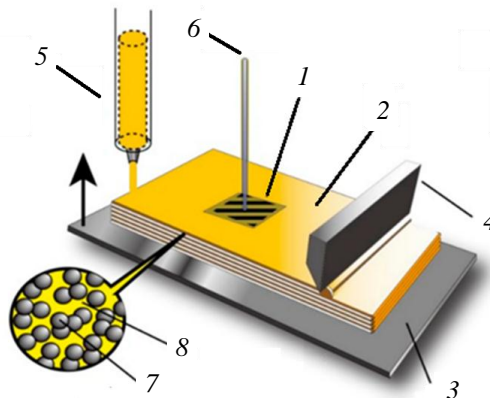


Рис. 2. Принцип действия технологии лазерной стереолитографии (SLA): 1 – печатаемое изделие, 2 – керамическая паста, 3 – платформа построения, 4 – рекоатер, 5 – система подачи керамической пасты, 6 – ультрафиолетовый лазер, 7 – частицы гидроксиапатита, 8 – фотоотверждаемое полимерное связующее

В качестве материала для реализации данной технологии применяются композиции, состоящие из керамического порошка и фотополимерного связующего. С целью ускорения процесса активации фотополимеризации в состав данной композиции вводят фотоинициатор. Хотя данный компонент может оказывать токсическое действие на клетки, если его остатки прикрепятся к напечатанным объектам [24]. Безусловно, изделия, получаемые для медицинского применения, проходят многостадийный контроль до момента их имплантации в организм человека. Поэтому случай токсического воздействия на клетки, вызванный неполным удалением связующего из изделия, является скорее исключением, чем общей практикой.

Следует отметить, что процесс получения изделий по технологии SLA представляет собой целый цикл, который включает следующие стадии: 3D-печать, термическое удаление полимерного связующего и спекание керамики. После каждого промежуточного процесса в обязательном порядке проводится контроль, который минимизирует брак получаемого изделия.

Технология лазерной стереолитографии все чаще используется в биоинженерии. Например, в работе [25] изготовлены композиционные скаффолды на основе ГА (30 % (по массе)) и полиакрилата (рис. 3). Авторы данной работы определили режимы постобработки «зеленого тела», позволяющие избежать перекрытия пор и топографических дефектов (трещины на поверхности). Для этого «зеленое тело» подвергали промывке ацетоном с последующей УФ-сушкой и обработкой диоксидом углерода.

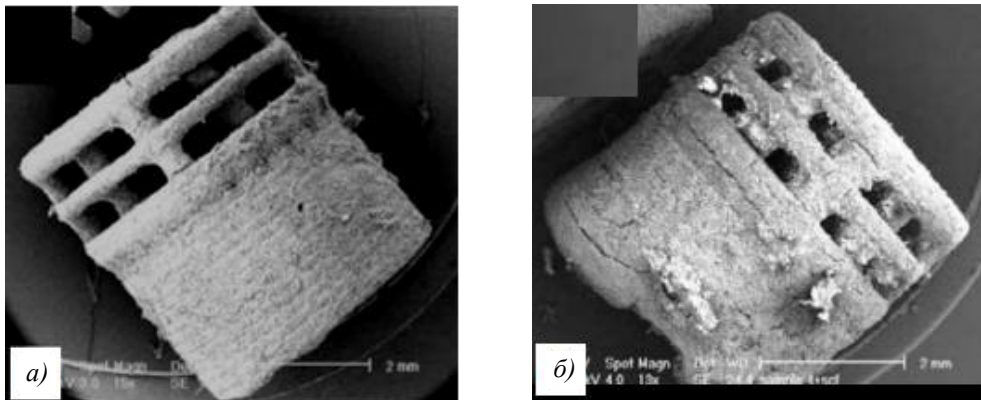


Рис. 3. Внешний вид скаффолда, полученного методом лазерной стереолитографии (SLA): *а* – вид сбоку; *б* – поперечное сечение

В работе [26] из ГА получены микропористые матрицы методом лазерной стереолитографии с видимым светом. Системы печати с видимым светом позволяют снизить потенциальный риск канцерогенеза, который может возникнуть при длительном воздействии УФ-излучения. Так, в исследовании [27] технология лазерной стереолитографии применена для изготовления композиционного скаффолда на основе ГА. В приведенном исследовании также проведена оценка безопасности фотоотверждаемого связующего. Показано, что полученный композиционный матрикс обладает токсическими эффектами, которые возникли при термическом воздействии в процессе удаления связующего. После имплантации матрикса в теменную кость кролика осложнений, таких как инфицирование или ухудшение жизненных показателей, не возникало. На восьмой неделе наблюдений область дефекта существенно уменьшилась, что указывает на положительный результат имплантации матрикса, полученного методом лазерной стереолитографии.

Технология лазерной стереолитографии, несмотря на широкие возможности, имеет ряд ограничений [28]. Например, захват непрореагировавших мономеров и их остатков, а также использование фотоинициаторов способны нарушить целостность синтеза скаффолда и тем самым повысить риск цитотоксичности. Учитывая ограничивающие факторы, авторы работы [28] смогли получить скаффолд из ГА (рис. 4). Проведенные исследования показали, что скаффолды из ГА способны кратковременно поддерживать выживание и пролиферацию клеток. В то же время, например, скаффолды, полученные из трикальцийфосфата, подвержены нарушению механизма прикрепления и распространения клеток.

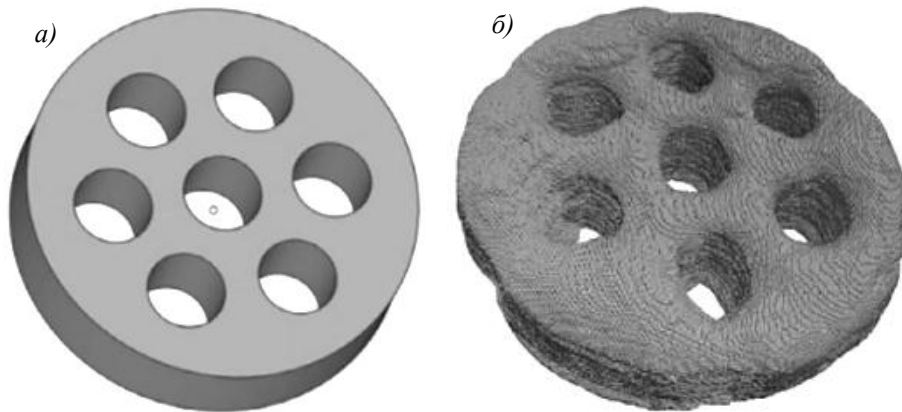


Рис. 4. Скаффолд на основе гидроксиапатита, полученный методом лазерной стереолитографии (SLA): *а* – 3D-модель; *б* – внешний вид полученного образца

Лазерная стереолитография обладает целым рядом преимуществ, позволяющих получать сложные структуры различных геометрических форм биомедицинского назначения. К основным преимуществам данной технологии относят высокую точность печати, позволяющую получать изделия сложной конфигурации с толщиной стенки до 0,1 мм, к недостаткам – высокую стоимость оборудования и сложность получения паст для печати.

Послойное наплавление

Технология послойного наплавления (FDM) представляет собой выдавливание термопластичного полимера, который подается через экструдер в виде тонкой нити на рабочую поверхность. Термопластичный полимер может подаваться в экструдер в виде проволоки (рис. 5, *а*) или вязкой пасты (рис. 5, *б*).

Данная технология позволяет получать сложные структуры, но с существенно меньшим разрешением по сравнению, например, с лазерной стереолитографией или цифровой обработкой светом. Помимо этого, для построения сложных структур требуются поддерживающие структуры, которые после печати необходимо удалить, что существенно усложняет применение данной технологии. Несмотря на это, FDM-технология активно используется в биоинженерии благодаря низкой стоимости оборудования и относительной простоте подготовки исходных материалов для печати по сравнению с более сложными и дорогостоящими технологиями, упомянутыми ранее. Изделия, полученные по FDM-технологии, также требуют термического удаления технологического связующего и последующего спекания для обеспечения необходимых свойств.

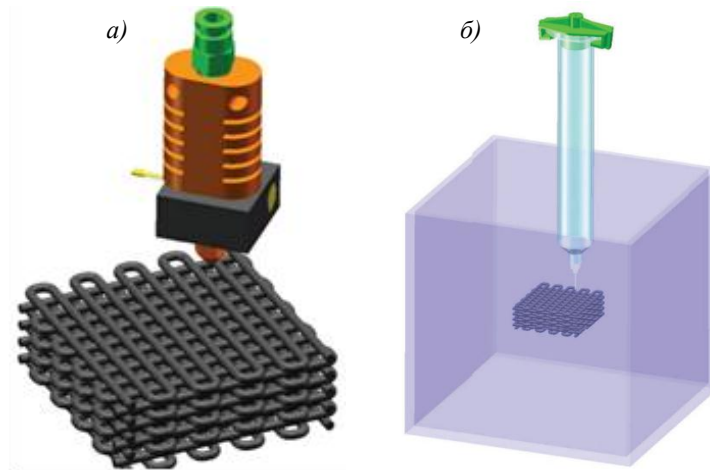


Рис. 5. Схематическое изображение принципов действия технологии послойного наплавления (FDM) с подачей материала в виде проволоки (а) и вязкой пасты (б)

Яркий пример применения технологии FDM, позволившей получить композиционный каркас, представлен в работе [29]. Авторы изготовили композиционный каркас на основе ГА и полипропиленфумарата с высокими механическими характеристиками при сжатии. Взяв за основу работу [30], авторы публикации [31] объединили достоинства синтетического деградируемого термопластичного полимера на основе полимолочной кислоты и остеопроводящего ГА для печати композиционных каркасов индивидуальной формы (рис. 6). В последующем на основании работ [29, 30] в работе [31] удалось создать высококонцентрированную пасту на основе ГА для прямой печати скаффолдов. Работы [28–31] позволили подтвердить пригодность полученных скаффолдов для регенерации костных тканей.

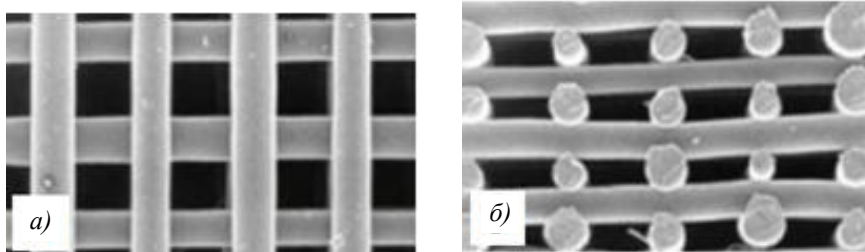


Рис. 6. Примеры пористых скаффолдов из гидроксиапатита, полученных по технологии послойного наплавления (FDM)

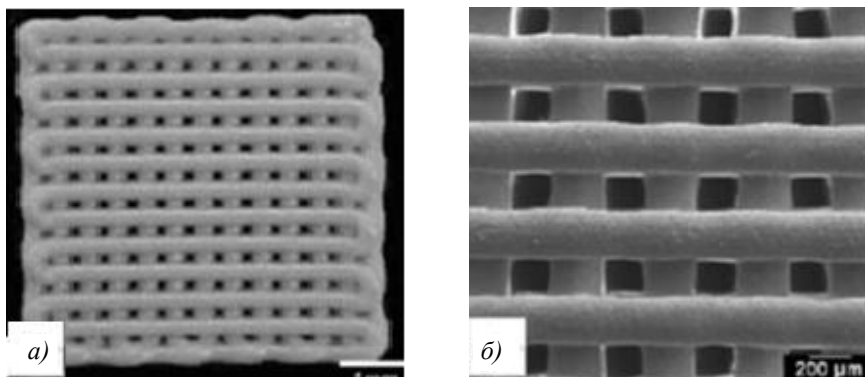


Рис. 7. Оптические изображения скаффолдов из гидроксиапатита, полученных по технологии послойного наплавления (FDM)

Авторы работы [31] также получили скаффолд на основе ГА (45 % (объемн.)) с трехмерной периодической архитектурой и многомасштабной пористостью методом FDM (рис. 7). Спекание полученных скаффолдов проводили при температурах от 1200 до 1300 °С для регулирования их микропористости. Помимо этого, по данным анализа методом рентгеновской дифракции, установлено, что в заданном температурном интервале спекания деградации ГА не происходило.

Струйная печать

Струйная 3D-печать является одной из технологий, применяемых в биоинженерии. Принцип действия заключается в струйном нанесении связующего, подаваемого через сопла, на керамический слой (рис. 8). Возможность струйной подачи через несколько сопел сразу существенно ускоряет печать и не оказывает значительного влияния на качество структуры, получаемой с помощью данной технологии. К недостаткам струйной 3D-печати относят ограниченное разрешение печати в вертикальном направлении, что обусловлено задержкой отверждения слоя после нанесения капель из-за низкой вязкости применяемых связующих (3,5–12,0 МПа·с). Использование связующих большей вязкости невозможно ввиду ограничений, имеющих у сопел. В процессе струйной печати при подаче капель на слой керамического порошка также происходят их частичное схлопывание и пузырькование, что может привести к образованию дефектов в процессе 3D-печати (поры, деламинация слоя, трещины). Струйная 3D-печать, как и другие аддитивные технологии, применяемые в биоинженерии, требует удаления связующего и проведения процесса спекания.

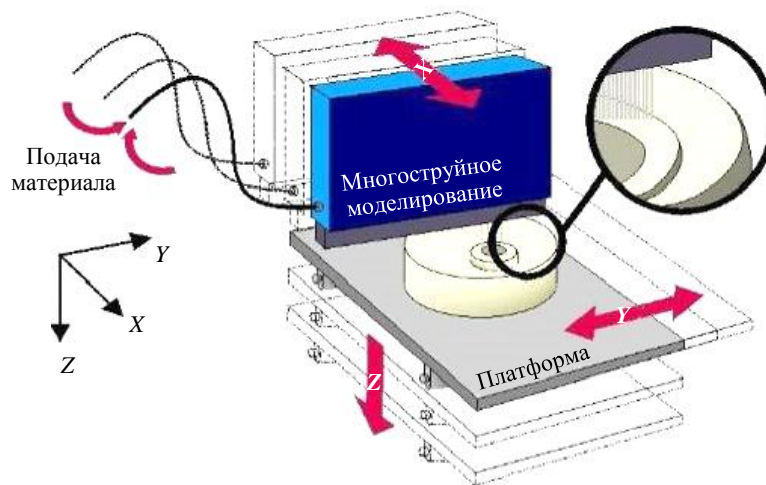


Рис. 8. Принцип действия струйной технологии 3D-печати (CJP)

Применение струйной печати для получения биомедицинских изделий из чистого ГА до недавних пор было ограничено. В первую очередь это связано с плохой реакционной способностью чистого ГА по отношению к стандартным связующим на водной основе. В работе [32] проведены исследования, направленные на повышение пригодности чистого ГА для 3D-печати. Объектом исследования были связующие из поливинилового спирта и мальтодекстрина. Результаты проведенных исследований (рис. 9) позволили определить, что использование поливинилового спирта с высокой молекулярной массой в количестве 30 % (по массе) в качестве связующего позволяет достичь достаточной геометрической точности и хороших показателей прочности при сжатии образцов, полученных струйной печатью, в сыром состоянии ($5,63 \pm 0,27$ МПа).

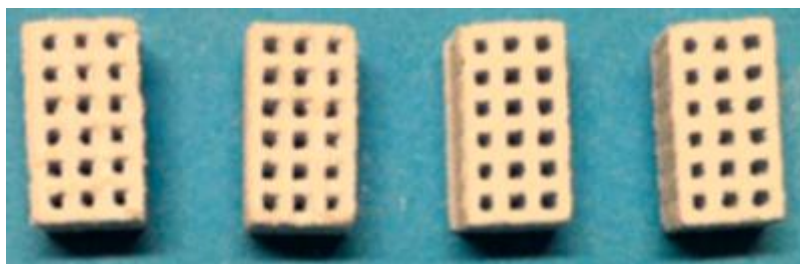


Рис. 9. Внешний вид образцов из гидроксиапатита, полученных методом струйной печати (CJP)

Цифровая обработка светом

Технология цифровой обработки светом – процесс, при котором керамическая суспензия, находящаяся в специальной емкости (ванне), селективно отверждается посредством проходящих реакций фотополимеризации, активируемых УФ или видимым диапазоном света (рис. 10). В качестве исходного сырья используют высоконаполненную фотоотверждаемую керамическую суспензию, в которой функции дисперсионной среды выполняет фотореактивная смола, а функции дисперсной фазы – керамические частицы.

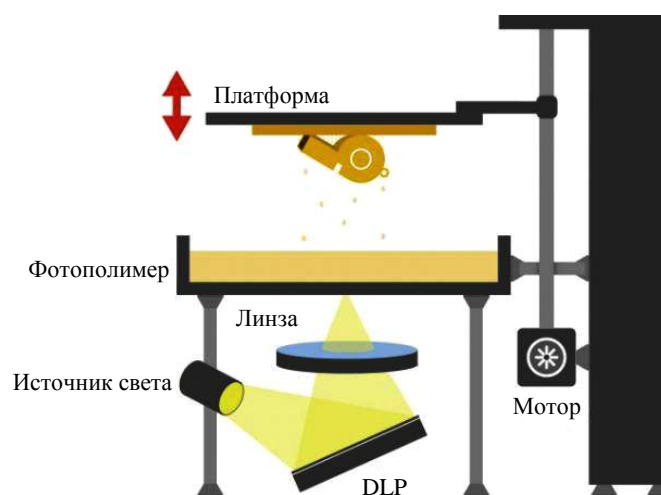


Рис. 10. Принцип действия 3D-печати по технологии цифровой обработки светом (DLP)

Технология цифровой обработки светом позволяет получать сложные керамические изделия биомедицинского назначения с меньшим качеством печати, чем технология SLA, но более качественные по сравнению с технологиями FDM и CJP. Сложности применения технологии цифровой обработки светом также связаны с тем, что для получения керамического изделия высокого качества наполнение твердой составляющей должно быть $\geq 40\%$ (объемн.) и при этом получаемая суспензия должна обладать вязкостью < 5 Па·с. В то же время технология лазерной стереолитографии позволяет получать изделия высокого качества с наполнением порошка $> 80\%$ (объемн.) и с более высокой вязкостью по сравнению с технологией цифровой обработки светом. Помимо этого, технология DLP, так же как и SLA, имеет ограничения по светопропускаемости материалов. Поэтому большинство научно-исследовательских работ, где показано применение данной технологии, направлены на получение биомедицинских изделий из ГА. Так, в работе [15] из модифицированного ГА изготовлены каркасы со следующими характеристиками: прочность при сжатии 15,25 МПа, пористость 49,8 %, средний размер пор 300–600 мкм. Проведенное исследование позволило выявить потенциал технологии DLP для получения подобных изделий. Применение того же модифицированного ГА

в работе [33] позволило получить скаффолды, предназначенные для вживления в поврежденную кость человека (рис. 11). Авторы данной работы предложили механизм регулирования физико-химических свойств, пористости и прочности при сжатии. Он заключался в изменении соотношения ГА и трикальцийфосфата. Таким образом можно адаптировать скорость деградации скаффолда к скорости роста пораженного участка кости.

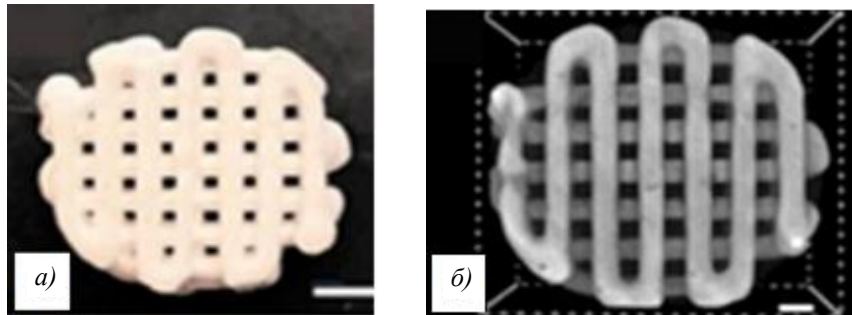


Рис. 11. Скаффолд на основе гидроксиапатита, полученный методом цифровой обработки светом (DLP): *a* – внешний вид; *б* – изображение, полученное методом компьютерной томографии

Заключения

Применение аддитивных технологий для биомедицинского назначения является перспективным направлением. Внедрение аддитивных технологий в медицину в области регенерации костных тканей – сложный и многоэтапный процесс. В первую очередь это вызвано многочисленными требованиями к медицинским изделиям. В случае с применением инновационных методов все становится еще сложнее. Несмотря на это, существует большое количество научно-исследовательских работ, в которых показано, что аддитивные технологии существенно превосходят традиционные методы, в том числе в области получения трехмерных структур биомедицинского назначения. Кроме того, существуют примеры клинического применения скаффолдов, полученных с помощью аддитивных технологий, на животных. Все это свидетельствует о том, что применение аддитивных технологий в биомедицине вызывает большой интерес и имеет огромный потенциал для развития.

Безусловно, применение аддитивных технологий в инженерии костных тканей возможно при условии, что получаемые изделия будут безопасны для их интегрирования в человеческое тело. Поэтому очень важно, чтобы применяемые материалы обладали не только высокими физико-механическими характеристиками, но и полной биосовместимостью. Помимо этого, скаффолды, полученные аддитивными методами, должны быть аналогичны настоящей кости по таким показателям, как пористость, скорость деградации, остеогенная способность, в противном случае применение подобных технологий невозможно.

Одним из самых распространенных материалов для регенерации костных тканей является ГА ввиду идентичности их характеристик.

Аддитивное производство скаффолдов на основе ГА возможно с использованием целого ряда технологий (SLA, DLP, CJP, FDM). Каждая из приведенных технологий имеет свои достоинства и недостатки. Например, высокое качество изделия и его сложное геометрическое строение могут обеспечить технологии лазерной стереолитографии и цифровой обработки светом. Для получения скаффолдов с более простой структурой применимы технологии послойного наплавления (FDM) и струйной печати. Данные технологии значительно дешевле по сравнению с SLA и DLP, но не могут обеспечить получение более сложных структур.

Список источников

1. Гуров Д.А., Павлюкович Н.Г., Цапенко А.Н. 3D-печать композиционным органическим филаментом на основе жидкокристаллических полимеров и полиэфирэфиркетона // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 62–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-62-81.
2. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). С. 65–77. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
3. 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.
4. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Качаев А.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 75–83. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
5. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы // *Металлы Евразии*. 2017. № 3. С. 2–6.
6. Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф., Гюнтер В.Э. Биосовместимые пористые проницаемые материалы // *Биосовместимые материалы и имплантаты с памятью формы: сб. материалов всерос. конф. / под ред. В.Э. Гюнтера*. Томск: Изд-во НТЛ, 2003. С. 9–24.
7. Способ получения биосовместимой пористой керамики на основе диоксида циркония для эндопротезирования: пат. RU2741918C1 Рос. Федерация; заявл. 29.06.20; опубл. 29.01.21.
8. Сафронова Т.В., Путляев В.И., Иванов В.К. и др. Порошковые смеси на основе гидрофосфата аммония и карбоната кальция для получения биосовместимой пористой керамики в системе CaO–P₂O₅ // *Новые огнеупоры*. 2016. Т. 1. № 9. С. 45–53.
9. Ковалько Н.Ю., Морозова Л.В., Калинина М.В., Шилова О.А. Синтез и физико-механические свойства биосовместимой керамики на основе T–ZrO₂ медицинского назначения // *Материалы науч. конф. «Неорганическая химия – фундаментальная основа в материаловедении керамических, стеклообразных и композиционных материалов»*. СПб.: ИХС РАН, 2016. С. 93–95.
10. Комлев В.С., Баринов С.М., Сергеева Н.С. и др. Пористые апатитовые биосовместимые матрицы для клеточных технологий реконструкции тканевых дефектов в хирургии // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 401. № 1. С. 49–51.
11. Микушина В.А., Сидоренко Ю.Н. Многоуровневый подход к моделированию биосовместимой пористой керамики. Томск: ИФПМ СО РАН, 2015. С. 414–415.
12. Lambert F., Vasevic M., Layrolle P. et al. Impact of biomaterial microtopography on bone regeneration: Comparison of three hydroxyapatites // *Clinical Oral Implants Research*. 2017. Vol. 28 (10). P. 201–207. DOI: 10.1111/clr.12986.
13. Gopi D., Kavitha L., Ramya S., Rajeswari D. Chemical and green routes for the synthesis of multifunctional pure and substituted nanohydroxyapatite for biomedical applications // *Engineering of Nanobiomaterials*. William Andrew Publishing, 2016. P. 485–521.
14. Lin K., Chang J. Structure and properties of hydroxyapatite for biomedical applications // *Hydroxyapatite (Hap) for Biomedical Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. P. 3–19.
15. Seitz H., Rieder W., Irsen S. et al. Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering // *Journal of Biomedical Materials Research*. 2005. Vol. 72 (2). P. 3–19. DOI: 10.1002/jbm.b.30291.
16. Shuai C., Feng P., Yang B. et al. Effect of nano-zirconia on the mechanical and biological properties of calcium silicate scaffolds // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2014. Vol. 12 (6). P. 1148–1156. DOI: 10.1111/ijac.12337.
17. Мифтахов А.Р. Наноструктурированные композиты. Исследования в области биоинженерии // *Материалы XXXX Всерос. науч.-практ. конф. «Модернизация образования в условиях технологических и цифровых нововведений: Теория и практика»*. Ростов н/Д, 2021. С. 63–67.

18. Гришина И.П., Дударева О.А., Маркелова О.А., Лясникова А.В. Наноматериалы и композиты на их основе для биоинженерии // *Материалы Междунар. молодежной науч. конф. «Будущее науки–2013»*: в 3 т. Курск, 2013. Т. 3. С. 224–226.
19. Lu T., Li Y., Chen T. Techniques for fabrication and construction of three-dimensional scaffolds for tissue engineering // *International journal of nanomedicine*. 2013. Vol. 8. P. 337–350.
20. Kumar A., Kargozar S., Baino F., Han S. Additive manufacturing methods for producing hydroxyapatite and hydroxyapatite-based composite scaffolds: a review // *Frontiers in Materials*. 2019. Vol. 6. P. 313.
21. Mondal D., Srinivasan A., Comeau P. et al. Acrylated epoxidized soybean oil/hydroxyapatite-based nanocomposite scaffolds prepared by additive manufacturing for bone tissue engineering // *Materials Science and Engineering: C*. 2021. Vol. 118. P. 111400.
22. Zarei A., Farazin A. Synergizing additive manufacturing and machine learning for advanced hydroxyapatite scaffold design in bone regeneration // *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2025. Vol. 3. P. 797–813.
23. Soleymani S., Naghib S.M. 3D and 4D printing hydroxyapatite-based scaffolds for bone tissue engineering and regeneration // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 9. P. 67–74.
24. Mondschein R.J., Kanitkar A., Williams C.B. et al. Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds // *Biomaterials*. 2017. Vol. 9. P. 67–74. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2017.06.005.
25. Barry J.J., Evseev A.V., Markov M.A. et al. In vitro study of hydroxyapatitebased photocurable polymer composites prepared by laser stereolithography and supercritical fluid extraction // *Biomaterials*. 2008. Vol. 4. P. 1603–1610.
26. Woesz A., Rumpfer M., Stampfl J. et al. Towards bone replacement materials from calcium phosphates via rapid prototyping and ceramic gelcasting // *Materials Science and Engineering*. 2005. Vol. 25. P. 181–186.
27. Chen Q., Zou B., Lai Q. et al. A study on biosafety of HAP ceramic prepared by SLA-3D printing technology directly // *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 98. P. 327–335.
28. Le Guéhennec L., Van Hede D., Plougonven E. et al. In vitro and in vivo biocompatibility of calcium-phosphate scaffolds three-dimensional printed by stereolithography for bone regeneration // *Journal of Biomedical Materials Research*. 2020. Vol. 108. P. 412–425.
29. Trachtenberg J.E., Placone J.K., Smith B.T. et al. Fabrication and Mechanical Characterization of 3D Printed Vertical Uniform and Gradient Scaffolds for Bone and Osteochondral Tissue Engineering // *Biomaterials Science*. 2017. Vol. 28. P. 532–554.
30. Malayeri A., Gabbott C., Reilly G. et al. Fabrication and Evaluation of Custom Scaffolds for Craniofacial Surgery and Tissue Engineering // *Regenerative Medicine*. 2016. Vol. 6. P. 36.
31. Michna S., Wu W., Lewis J.A. Biomaterials for bioprinting microvasculature // *Biomaterials*. 2005. Vol. 26. P. 5632–5639.
32. Zhou Z., Lennon A., Buchanan F. et al. Binder jetting additive manufacturing of hydroxyapatite powders: Effects of adhesives on geometrical accuracy and green compressive strength // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 10. P. 16–45.
33. Liu Z.B., Liang H.X., Shi T.S. et al. Additive manufacturing of hydroxyapatite bone scaffolds via digital light processing and in vitro compatibility // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. P. 11079–11086.

References

1. Gurov D.A., Pavlyukovich N.G., Tsapenko A.N. 3D printing with composite organic filament based on liquid crystal polymers and polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 62–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-62-81.
2. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 65–77. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
3. 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.

4. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Kachaev A.A. Methods for joining ceramic composite materials based on SiC with ceramic and metallic materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 75–83. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 04, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
5. Kablov E.N. Dominant of the National Technological Initiative. *Metally Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
6. Khodorenko V.N., Yasenchuk Yu.F., Gunter V.E. Biocompatible porous permeable materials. *Biocompatible materials and implants with shape memory*: col. of materials of the All-Rus. conf. Ed. V.E. Gunter. Tomsk: NTL Publ. House, 2003, pp. 9–24.
7. *Method for producing biocompatible porous ceramics based on zirconium dioxide for endoprosthetics*: pat. RU2741918C1 Rus. Federation; appl. 29.06.20; publ. 29.01.21.
8. Safronova T.V., Putlyaev V.I., Ivanov V.K. et al. Powder mixtures based on ammonium hydrophosphate and calcium carbonate for obtaining biocompatible porous ceramics in the CaO–P₂O₅ system. *Novye ognepory*, 2016, vol. 1, no. 9, pp. 45–53.
9. Kovalko N.Yu., Morozova L.V., Kalinina M.V., Shilova O.A. Synthesis and physicomechanical properties of biocompatible ceramics based on T–ZrO₂ for medical purposes. *Proc. conf. «Inorganic chemistry – a fundamental basis in materials science of ceramic, glassy, and composite materials»*. St. Petersburg: Institute of Chemical Synthesis of RAS, 2016, pp. 93–95.
10. Komlev V.S., Barinov S.M., Sergeeva N.S. et al. Porous apatite biocompatible matrices for cellular technologies for reconstruction of tissue defects in surgery. *Doklady Akademii nauk*, 2005, vol. 401, no. 1, pp. 49–51.
11. Mikushina V.A., Sidorenko Yu.N. *Multilevel approach to modeling biocompatible porous ceramics*. Tomsk: ISPMS SB RAS, 2015, pp. 414–415.
12. Lambert F., Bacevic M., Layrolle P. et al. Impact of biomaterial microtopography on bone regeneration: Comparison of three hydroxyapatites. *Clinical Oral Implants Research*, 2017, vol. 28 (10), pp. 201–207. DOI: 10.1111/clr.12986.
13. Gopi D., Kavitha L., Ramya S., Rajeswari D. Chemical and green routes for the synthesis of multifunctional pure and substituted nanohydroxyapatite for biomedical applications. *Engineering of Nanobiomaterials*. William Andrew Publishing, 2016, pp. 485–521.
14. Lin K., Chang J. Structure and properties of hydroxyapatite for biomedical applications. *Hydroxyapatite (Hap) for Biomedical Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, pp. 3–19.
15. Seitz H., Rieder W., Irsen S. et al. Three-dimensional printing of porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2005, vol. 72 (2), pp. 3–19. DOI: 10.1002/jbm.b.30291.
16. Shuai C., Feng P., Yang B. et al. Effect of nano-zirconia on the mechanical and biological properties of calcium silicate scaffolds. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2014, vol. 12 (6), pp. 1148–1156. DOI: 10.1111/ijac.12337.
17. Miftakhov A.R. Nanostructured composites. Research in the field of bioengineering. *Proceedings of the XXXX All-Rus. sc. and pract. conf. «Modernization of education in the context of technological and digital innovations: Theory and practice»*. Rostov-on-Don, 2021, pp. 63–67.
18. Grishina I.P., Dudareva O.A., Markelova O.A., Lyasnikova A.V. Nanomaterials and composites based on them for bioengineering. *Proceedings of the Int. Youth Scientific Conf. «The Future of Science–2013»*: in 3 vols. Kursk, 2013, vol. 3, pp. 224–226.
19. Lu T., Li Y., Chen T. Techniques for fabrication and construction of three-dimensional scaffolds for tissue engineering. *International journal of nanomedicine*, 2013, vol. 8, pp. 337–350.
20. Kumar A., Kargozar S., Baino F., Han S. Additive manufacturing methods for producing hydroxyapatite and hydroxyapatite-based composite scaffolds: a review. *Frontiers in Materials*, 2019, vol. 6, p. 313.
21. Mondal D., Srinivasan A., Comeau P. et al. Acrylated epoxidized soybean oil/hydroxyapatite-based nanocomposite scaffolds prepared by additive manufacturing for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, vol. 118, p. 111400.
22. Zarei A., Farazin A. Synergizing additive manufacturing and machine learning for advanced hydroxyapatite scaffold design in bone regeneration. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2025, vol. 3, pp. 797–813.
23. Soleymani S., Naghib S.M. 3D and 4D printing hydroxyapatite-based scaffolds for bone tissue engineering and regeneration. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 9, pp. 67–74.

24. Mondschein R.J., Kanitkar A., Williams C.B. et al. Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds. *Biomaterials*, 2017, vol. 9, pp. 67–74. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2017.06.005.
25. Barry J.J., Evseev A.V., Markov M.A. et al. In vitro study of hydroxyapatitebased photocurable polymer composites prepared by laser stereolithography and supercritical fluid extraction. *Biomaterials*, 2008, vol. 4, pp. 1603–1610.
26. Woesz A., Rumppler M., Stampfl J. et al. Towards bone replacement materials from calcium phosphates via rapid prototyping and ceramic gelcasting. *Materials Science and Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 181–186.
27. Chen Q., Zou B., Lai Q. et al. A study on biosafety of HAP ceramic prepared by SLA-3D printing technology directly. *Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 98, pp. 327–335.
28. Le Guéhennec L., Van Hede D., Plougonven E. et al. In vitro and in vivo biocompatibility of calcium-phosphate scaffolds three-dimensional printed by stereolithography for bone regeneration. *Journal of Biomedical Materials Research*, 2020, vol. 108, pp. 412–425.
29. Trachtenberg J.E., Placone J.K., Smith B.T. et al. Fabrication and Mechanical Characterization of 3D Printed Vertical Uniform and Gradient Scaffolds for Bone and Osteochondral Tissue Engineering. *Biomaterials Science*, 2017, vol. 28, pp. 532–554.
30. Malayeri A., Gabbott C., Reilly G. et al. Fabrication and Evaluation of Custom Scaffolds for Craniofacial Surgery and Tissue Engineering. *Regenerative Medicine*, 2016, vol. 6, pp. 36.
31. Michna S., Wu W., Lewis J.A. Biomaterials for bioprinting microvasculature. *Biomaterials*, 2005, vol. 26, pp. 5632–5639.
32. Zhou Z., Lennon A., Buchanan F. et al. Binder jetting additive manufacturing of hydroxyapatite powders: Effects of adhesives on geometrical accuracy and green compressive strength. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 10, pp. 16–45.
33. Liu Z.B., Liang H.X., Shi T.S. et al. Additive manufacturing of hydroxyapatite bone scaffolds via digital light processing and in vitro compatibility. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, pp. 11079–11086.

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

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

Бутузов Александр Владимирович, ведущий инженер, 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

Неруш Святослав Васильевич, начальник Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maxim 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

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

Alexander V. Butuzov, Leading Engineer, 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

Svyatoslav V. Nerush, Head of Scientific-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.12.2025.
The article was submitted 28.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 05.12.2025.