



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-4-77-90>

Обзорная статья

Review article



Аддитивное производство изделий с функционально-градиентной структурой по технологии селективного лазерного сплавления Обзор

Е. В. Борисов, А. В. Репнин , А. А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 repnin_arseniy@mail.ru

Аннотация. Представлен обзор современных достижений в области функционально-градиентного аддитивного производства по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС). Рассмотрены основные принципы создания изделий с функционально-градиентной структурой методом СЛС, включая способы формирования градиентного состава и структуры. Описан процесс формирования переходного слоя синтезируемого материала, который является ключевым для обеспечения требуемых свойств изделий. Проанализированы методы проектирования и моделирования изделий с функционально-градиентной структурой, в том числе с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения. Показано, что применение природоподобных принципов строения позволяет создавать изделия с улучшенными механическими, тепловыми и функциональными свойствами. Рассмотрены примеры успешного получения мультиматериальных структур с заданной анизотропией свойств, а также изделий с контролируемым градиентом пористости. Определены перспективные направления применения изделий с функционально-градиентной структурой, включая аэрокосмическую отрасль, медицину, машиностроение и энергетику.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление (СЛС), функционально-градиентные материалы, мультиматериалы, метаматериалы, проектирование, искусственный интеллект

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Для цитирования: Борисов Е.В., Репнин А.В., Попович А.А. Аддитивное производство изделий с функционально-градиентной структурой по технологии селективного лазерного сплавления. Обзор. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(4):77–90. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-4-77-90>

Additive manufacturing of functionally graded products by selective laser melting: A review

E. V. Borisov, A. V. Repnin , A. A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
29 Politekhnikeskaya Str., St. Petersburg 195251, Russia repnin_arseniy@mail.ru

Abstract. This paper presents a review of recent advances in functionally graded additive manufacturing using selective laser melting (SLM, also referred to as laser powder bed fusion, LPBF). The fundamental principles of producing functionally graded products by SLM are discussed, including approaches to forming compositional and structural gradients. Particular attention is given to the formation of the transition layer in the synthesized material, which is crucial for achieving the desired properties

of the products. Methods of design and numerical modeling of functionally graded structures are analyzed, including the use of artificial intelligence and machine learning. It is demonstrated that applying bio-inspired design principles enables the development of parts with enhanced mechanical, thermal, and functional properties. Examples are provided of successful fabrication of multi-material products with tailored property anisotropy, as well as products with controlled porosity gradients. The promising application areas of functionally graded products are identified, including aerospace, medicine, mechanical engineering, and energy.

Keywords: selective laser melting, functionally graded materials, multi-materials, metamaterials, design, artificial intelligence

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-79-30004, <https://rscf.ru/en/project/23-79-30004/>.

For citation: Borisov E.V., Repnin A.V., Popovich A.A. Additive manufacturing of functionally graded products by selective laser melting: A review. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(4):77–90. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-4-77-90>

Введение

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) представляют собой инновационный класс материалов, характеризующихся непрерывным изменением состава, структуры и свойств в одном или нескольких направлениях [1]. Концепция ФГМ изначально была разработана для аэрокосмической отрасли в Японии в 1980-х годах как решение проблемы создания термостойких материалов, способных выдерживать высокий градиент температуры и значительные механические нагрузки [2]. В отличие от традиционных композитов с резкими границами раздела между компонентами ФГМ характеризуются плавным переходом свойств, что позволяет минимизировать концентрацию напряжений на границах и повысить общую надежность конструкции [3]. Для повышения эффективности реализации принципа получения ФГМ в последнее время широко используются аддитивные технологии, в частности селективное лазерное сплавление (СЛС) [4]. Благодаря возможности точного контроля параметров процесса и состава материала на микроуровне, аддитивные технологии позволяют создавать изделия с функционально-градиентной структурой с заданным распределением свойств, таких как плотность, пористость, твердость, теплопроводность, электропроводность, коррозионная стойкость, биосовместимость и др. [5]. В частности, использование ФГМ позволяет решать такие задачи, как снижение веса конструкций при сохранении прочностных характеристик, повышение термостойкости, улучшение демпфирующих свойств, создание биомедицинских имплантатов с градиентом пористости для лучшей остеоинтеграции и многие другие [6].

Для усиления эффекта использования ФГМ эффективно применение природоподобных принципов строения. Природоподобные материалы воспроизводят принципы живой природы, доказавшие свою эффективность за миллионы лет эволюции [7–11]. Природа выработала стратегии синтеза материалов с исключительными свойствами и многофункцио-

нальностью через неоднородное строение. И хотя природа ограничена в выборе составляющих, современные ученые располагают широким спектром синтетических компонентов [12; 13]. Живые организмы состоят из природных материалов в сложном иерархическом порядке от нано- до макромасштаба и могут быть классифицированы по выраженным механическим, электрическим, оптическим, поверхностным характеристикам и свойствам изменения формы. Примерами служат чешуя рыб с отличными защитными свойствами, паучий шелк и перламутр с превосходной прочностью, а также растения и животные, демонстрирующие возможность изменения формы для выживания [14–17]. На основе этих природных структур создаются коммерческие продукты в машиностроении, робототехнике, авиационном и архитектурном, причем степень соответствия природоподобных материалов зависит от технологий получения – чем точнее воспроизведение, тем более развитыми должны быть технологии [18–23].

В настоящее время многие лаборатории успешно занимаются исследованием и разработкой технологий производства изделий с функционально-градиентной структурой. В частности, институт Фраунгофера в Германии имеет большой опыт в проектировании и создании изделий с функционально-градиентной структурой из металлических, керамических и полимерных материалов. Помимо этого, ученые из исследовательских лабораторий университета Минью (Брага, Португалия), Государственного университета Вашингтона, Харбинского инженерного университета, Хуачжунского университета науки и технологии, Делфтского технического университета, Сингапурского технологического и проектного университета, а также Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого также активно публикуют свои работы по проектированию и созданию изделий с функционально-градиентной структурой.

В данном обзоре представлен анализ современных достижений в области функционально-градиентного аддитивного производства по технологии СЛС.

Рассмотрены основные принципы создания изделий с функционально-градиентной структурой, включая способы формирования градиентного состава и структуры, образования переходного слоя синтезируемого материала, методы проектирования и моделирования, а также перспективные направления применения.

Функционально-градиентные материалы с переменной микроструктурой

Ключевыми параметрами процесса СЛС, влияющими на микроструктуру и свойства получаемых изделий, являются мощность лазера, скорость сканирования, расстояние между отдельными проходами (*hatch distance*), толщина слоя. Их взаимодействие определяет объемную плотность энергии, подводимой к материалу, что, в свою очередь, влияет на режим плавления, скорость охлаждения, формирование микроструктуры и наличие дефектов. Заданная стратегия и параметры лазерного сканирования могут способствовать формированию либо направленной структуры с заданной кристаллографической ориентацией, либо более равномерно распределенных равноосных зерен, либо комбинации вышеуказанных вариантов [24]. Изделие с функционально-градиентной структурой, созданное с различными областями мелкозернистой и высокоориентированной крупнозернистой структуры, доказывает возможность получения материалов, которые могут демонстрировать заданные пользователем функциональные характеристики в различных участках одной детали, но

при этом анизотропия механических свойств сильно зависит от текстуры [25].

Термическая обработка сплава Inconel 718, полученного методом СЛС, сохраняет исходную текстуру и морфологию зерен без признаков рекристаллизации, но приводит к формированию игольчатых преципитатов δ -Ni₃Nb и неизменных фаз Лавеса, что снижает пластичность материала при одновременном улучшении предела текучести за счет создания барьеров для движения дислокаций [26]. Даже после проведения горячего изостатического прессования сохраняются четкая микроструктурная граница между мелко- и крупнозернистыми областями и преимущественная текстура (100) в зонах крупных направленных зерен, значительно улучшаются механические свойства благодаря растворению нежелательных фаз Лавеса и δ -фазы, а также закрытию пор, что усиливает зависимость предела текучести от размера зерна согласно соотношению Холла–Петча. Комбинированная обработка «горячее изостатическое прессование (ГИП) + термообработка» обеспечивает превосходные механические характеристики по сравнению с литым и деформируемым сплавом Inconel 718 [28].

Разработанная технология создания градиентной структуры в никелевых сплавах позволяет изменять направление распространения усталостной трещины при ее переходе через переходную зону между различными структурами, замедляя рост и распространение разрушения [26]. Установлено, что при распространении усталостной трещины через переходную зону между различными структурами изменяется направление ее движения и, как следствие, замедляется скорость роста (рис. 1).

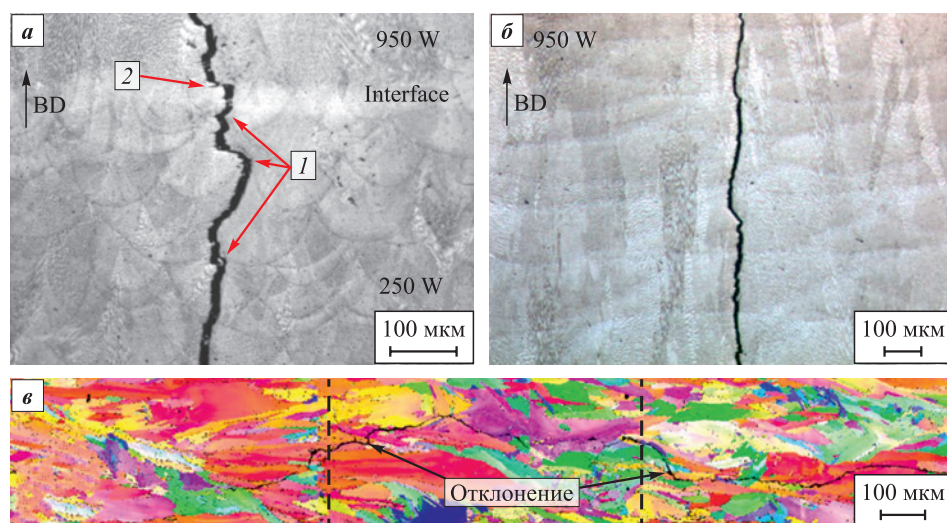


Рис. 1. Изменение траектории движения трещины в зависимости от параметров структуры [26], по результатам оптической (а, б) и сканирующей электронной (в) микроскопии [27]

Fig. 1. Crack path deviation as a function of microstructural parameters [26], based on optical (a, b) and scanning electron (c) microscopy [27]

Функционально-градиентные материалы с переменным составом

Недавние научные достижения позволили осуществить изготовление мультиматериальных изделий с улучшенными механическими свойствами за один производственный цикл в процессе СЛС [29]. Однако для этого требуются существенная переработка конструкции принтера и создание технологий подачи и распределения двух или более порошковых материалов и их последующего разделения [30]. Помимо этого, подобранные материалы должны быть свариваемыми и образовывать надежное соединение без дефектов [31]. Исследования системы «жаропрочная бронза – жаропрочный никелевый сплав ВЖ159 – БрХЦрТВ», полученной методом

СЛС, выявили, что значительное увеличение энергии существенно снижает пористость в переходных зонах мультиматериальных образцов (рис. 2, а). При этом распределение элементов в переходной зоне характеризуется взаимопроникновением Ni и Cu с обеих сторон (рис. 2, б), а микротвердость плавно изменяется от сплава ВЖ159 к БрХЦрТВ на протяжении около 300 мкм (рис. 2, в) [32–34].

Полное смешение сплавов, при котором оба материала фиксируются на рентгенограммах, продолжается до 6-го слоя сплава БрХЦрТВ, а на 7-м слое наблюдается переход к чистому сплаву БрХЦрТВ, что подтверждает ширину переходной зоны в 300 мкм при толщине одного слоя в 50 мкм (рис. 2, г). Механические испытания продемонстрировали, что мультиматериальный образец обладает пределом

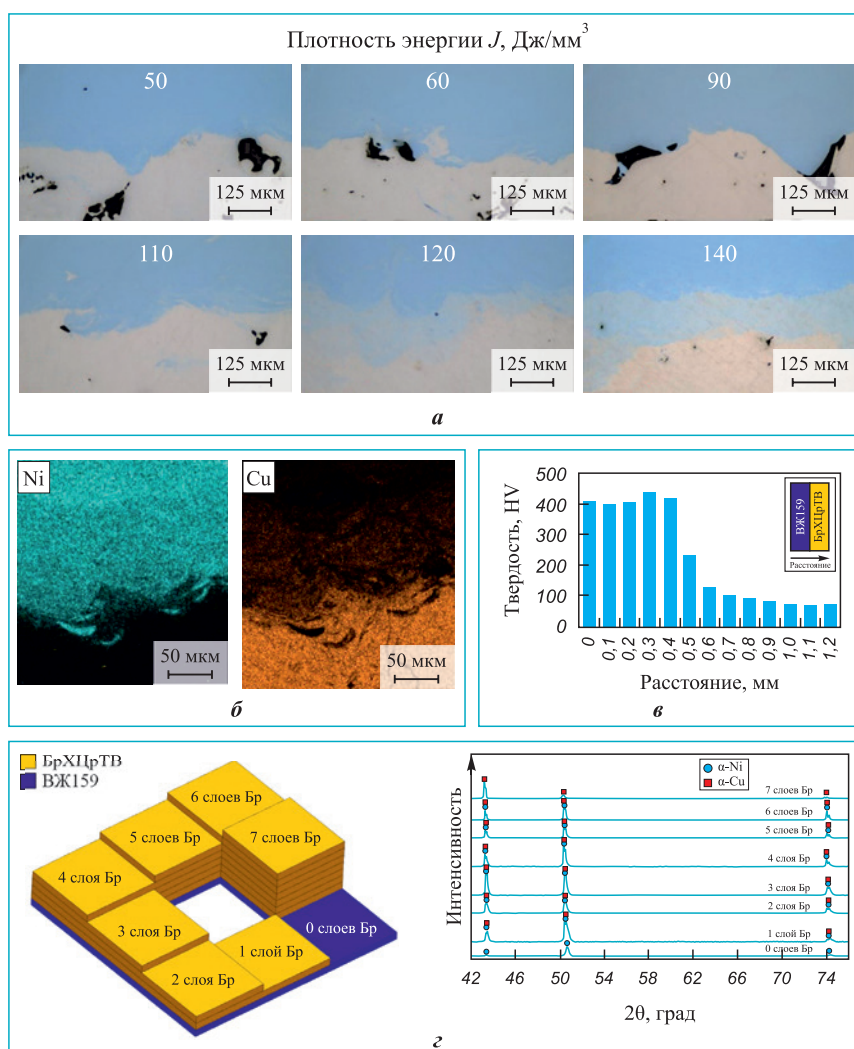


Рис. 2. Результаты исследования мультиматериальной системы ВЖ159/БрХЦрТВ [32–34]

а – анализ дефектов в переходной зоне; б – распределение элементного состава в переходной зоне;
в – исследование твердости; г – оценка ширины переходной зоны

Fig. 2. Results of the investigation of the multi-material system VZh159/BrKhZrTV [32–34]

а – defect analysis in the interfacial zone; б – elemental distribution in the interfacial zone;
в – microhardness profile; г – measurement of interfacial zone width



Рис. 3. Мультиматериальные модели с сетчатыми элементами и заданными свойствами

Fig. 3. Multi-material prototypes with lattice elements and tailored properties

прочности, более чем в 2 раза превышающим показатели БрХЦрТВ, хотя и не достигает характеристик ВЖ159, а для устранения дефекта непроплава при изменении состава в пределах одного слоя необходимо обеспечить зону перекрытия сплавов примерно 350–400 мкм. На рис. 3 продемонстрирован прототип изделия, которое может быть изготовлено на основе мультиматериальной системы ВЖ159/БрХЦрТВ.

В ходе исследования мультиматериального образца $\text{AlSi10Mg/Al-Si-Mg-Cu}$, изготовленного методом СЛС, установлено, что в области AlSi10Mg присутствуют только Al и Si без других фаз, тогда как в зоне Al-Si-Mg-Cu помимо Al и Si обнаружено небольшое количество фазы Al_2Cu , что подтверждается анализом химического состава [35]. Результаты измерений микротвердости после термической обработки показали, что зона Al-Si-Mg-Cu по твердости превосходит зону AlSi10Mg на 30 %.

Работы, посвященные мультиматериальной системе из титановых сплавов (BT6/BT1-0), полученной методом СЛС, показали, что в переходной зоне содержания Al и V плавно возрастают при движении от области BT1-0 к BT6 (рис. 4, а), а ширина переходной зоны составляет ~200 мкм [36; 37]. Анализировалось влияние расположения переходной зоны на механические свойства, а также оценивалось влияние мультиматериального строения на вязкость разрушения – скорость роста усталостной трещины (рис. 4, б и в).

Изучение уникальной мультиматериальной системы 316L/FeNi36 с эффектом изменения формы, полученной методом СЛС [38], выявило 3 характерные зоны распределения химического состава: зону

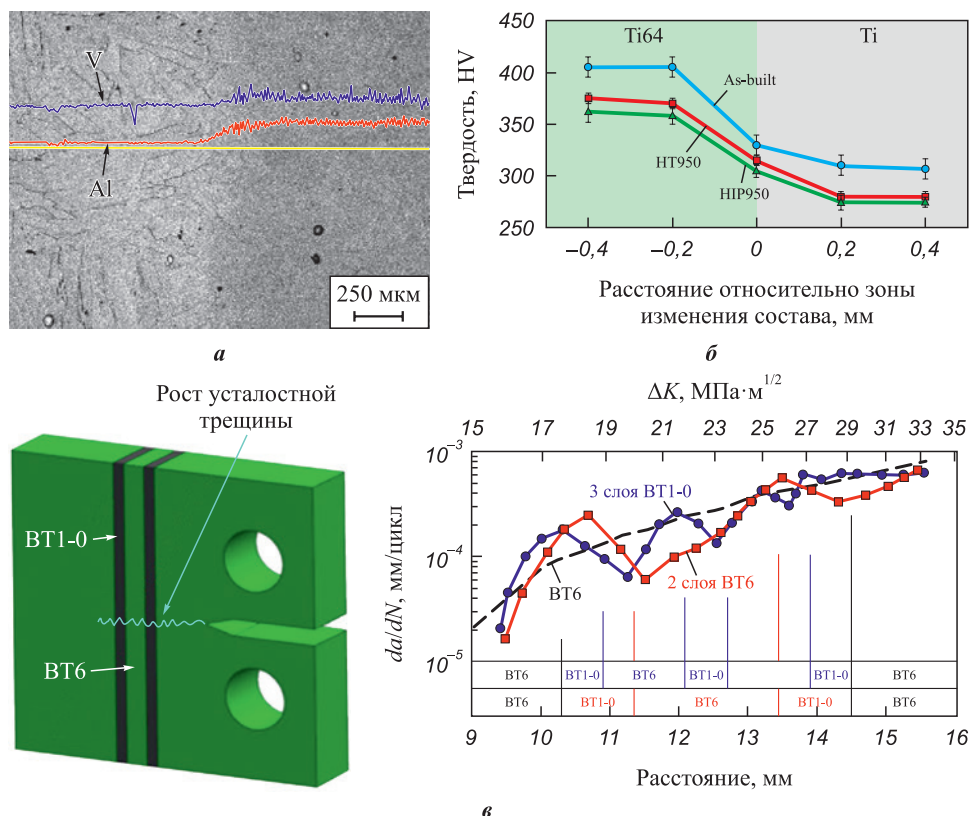


Рис. 4. Исследование мультиматериальной системы BT6/BT1-0 [36; 37]

а – изменение содержания V и Al в переходной зоне; б – изменение твердости HV по глубине поверхности; в – результаты испытаний на рост усталостной трещины

Fig. 4. Investigation of the VT6/VT1-0 multi-material system [36; 37]

а – distribution of V and Al in the interfacial zone; б – variation of Vickers hardness (HV) with depth; в – results of fatigue crack growth tests

состава FeNi64, переходную зону и зону 316L с размером переходной зоны около 50 мкм. Твердость варьируется от 163 HV в области состава FeNi36 до примерно 200 HV в переходной зоне и 214 HV в зоне 316L, а наиболее эффективный температурный диапазон для достижения максимальных перемещений находится в пределах 25–215 °С.

В исследованиях [39; 40] системы из несвариваемых сплавов Ti6Al4V/Inconel 718, полученной методом СЛС, для создания бездефектных изделий успешно использовались переходные слои из Cu и Cu + Nb, в которых не наблюдалось значительных дефектов, однако присутствовали области смещения сплавов. Анализ химического состава мультиматериалов с переходным слоем из Cu показал, что переходная зона между Cu и Ti6Al4V шире, чем между Cu и Inconel 718, а при использовании переходного слоя из Cu + Nb ширина переходных зон Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu оказывается небольшой с плавным переходом между Nb и Cu. Механические испытания продемонстрировали, что мультиматериальные образцы с переходными слоями из Cu + Nb обладают более высокими свойствами (предел прочности 910 МПа) по сравнению с образцами с переходным слоем из Cu (предел прочности 790 МПа). Хотя эти значения и уступают свойствам исходных сплавов, но при этом излом имеет ступенчатую структуру с четко выраженными зонами разрушения каждого материала с характерным для него механизмом разрушения.

В системе 316L/NiTi с переходным слоем из высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn [41] в переходной зоне мультиматериальных образцов формируется островковая макросегрегация, вызванная эффектом Марангони. Комплексный анализ фазового и химического составов вместе с измерениями твердости позволяет предположить образование интерметаллида FeTi в этих макросегрегациях, что, по мнению авторов, может способствовать образованию трещин из-за охрупчивающего действия данного интерметаллида.

Альтернативные методы создания мультиматериальных изделий включают различные технологии, позволяющие формировать композиции с уникальными свойствами при сохранении высокой функциональности конечных продуктов. Смешивание порошков позволяет создавать системы с переходным слоем, хотя некоторые образцы имеют ограничения в размерной точности [42]. При этом образцы из Ti5Al2.5Sn и Ti6Al4V демонстрируют бездефектные переходные зоны для ответственных конструкций в отличие от несовместимых сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 [43; 44]. Комбинирование СЛС с порошковой металлургией формирует перламутровые структуры в титановых сплавах с улуч-

шенным деформационным упрочнением [45], тогда как мультиматериалы из Inconel 718 и стали 316L достигают прочности 751,82 МПа при удлинении 25,14 % [46], что находит применение в высокоэффективных теплообменниках (316L/CuZr) для электроники и биоподобных имплантатах (Ti6Al4V/NiTi) для медицины [47; 48].

Процесс СЛС изделий из сплавов SS316L и CuSn10 значительно улучшает их функциональные характеристики [49], а создание природоподобных конструкций из сплавов 18Ni300, CoCrMo, 316L и CuSn обеспечивает заданную анизотропию в зависимости от направления нагрузки [50].

Функционально-градиентные материалы с эффектом памяти формы

Технология СЛС представляет собой исключительно перспективный метод для промышленного производства изделий из сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ), обладающих заданными функциональными характеристиками, благодаря возможности гибкого управления параметрами процесса при их изготовлении и проектировании не только геометрических параметров изделия, но и его функционального поведения. Особую ценность данный подход имеет в высокотехнологичных областях, требующих изготовления малогабаритных изделий со сложной геометрией, таких как медицинские стенты и имплантаты [51], актуаторы для авиакосмической отрасли [52] и др. Показана возможность создания требуемой структуры и функциональных свойств сплава NiTi, так называемого нитинола, за счет изменения параметров процесса СЛС [53; 54]. Повышение плотности энергии либо применение стратегии двойной лазерной обработки приводит к снижению содержания никеля в сплаве и повышению температур фазовых превращений [53].

Формирование заданных параметров структуры оказывает значительное влияние на результирующие свойства нитинола. Так, за счет изменения расстояния между отдельными треками лазера можно формировать направленную зеренную структуру, плотность дислокаций, размер окон фазовых превращений и термоциклическую стабильность в сплавах NiTi [55]. В области 4D-печати металлических материалов окна фазовых превращений и микроструктура (связанная с термомеханическим откликом) являются двумя важными факторами, обеспечивающими работоспособность сплавов с ЭПФ. Выявлено, что увеличение размера зерна способствует снижению температур фазовых превращений [56]. Дальнейшее развитие этого эффекта и создание кристаллографически ориентированной направленной структуры в сплаве NiTi позволяет существенно расширить зону сверх-

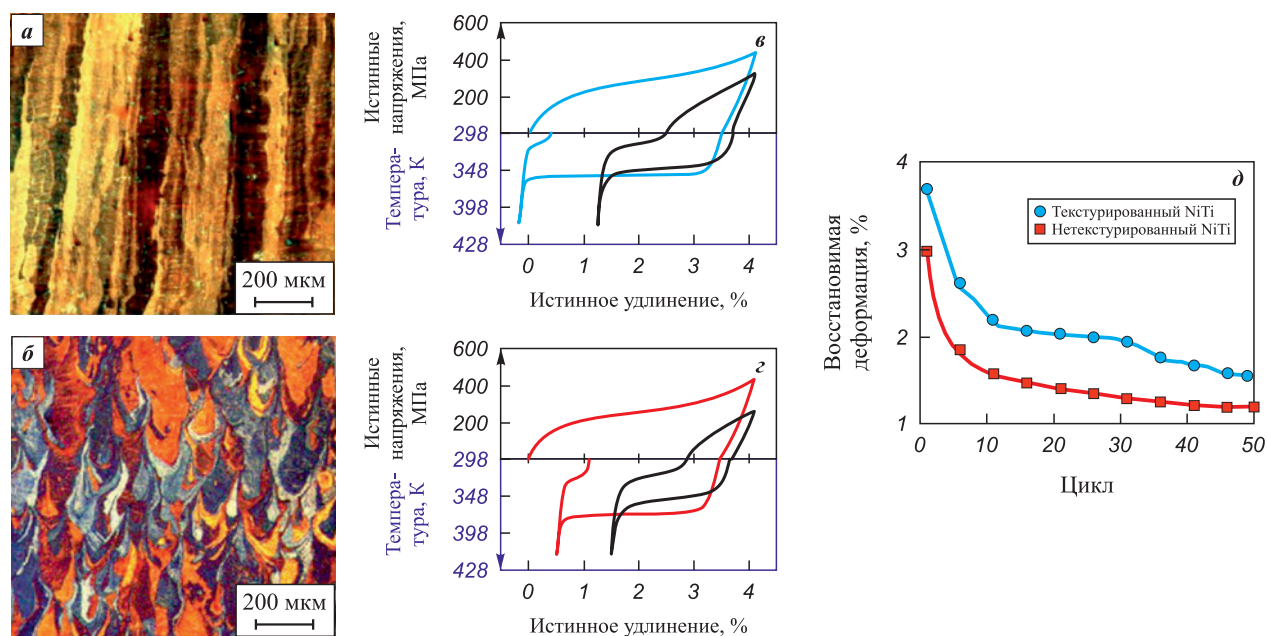


Рис. 5. Структура и кривые деформаций текстурированного (а, в) и нетекстурированного (б, з) сплавов NiTi, а также сравнение восстановимой деформации в зависимости от количества циклов (д) [57]

Fig. 5. Microstructure and strain curves of textured (a, в), and non-textured (б, з) NiTi alloys, and comparison of recoverable strain versus the number of cycles (д) [57]

упругости [57] и повысить стабильность эффекта памяти формы, уменьшив необратимые пластические деформации (рис. 5).

В сплаве NiTi с пониженным содержанием никеля (49,4 ат. %) и текстурой $\langle 001 \rangle$, полученном методом аддитивного производства, достигнута рекордная сверхупругость до 453 К с широкой температурной зоной в 110 К. Это обусловлено высокой устойчивостью к деформации и улучшенной совместимостью фазовых превращений между аустенитом и мартенситом. Разработанная методика одновременно повышает сверхупругость и стабильность памяти формы благодаря формированию текстурированного мартенсита и подавлению движения дислокаций преципитатами Ti_2NiO_x . Термическая обработка в основном влияет на наноразмерные выделения и атомные дефекты, практически не изменяя размеры и форму зерен. Прямое старение после СЛС способствует образованию фазы Ti_2NiO_x внутри зерен, тогда как гомогенизирующий отжиг растворяет метастабильный титан в матрице NiTi и снижает плотность дефектов. Все режимы термообработки усиливают фазовые превращения за счет повышения атомного соотношения Ti/Ni и снижения дефектов [58].

Функционально-градиентные метаматериалы

Метаматериалы – специально разработанные материалы с особой внутренней архитектурой (геомет-

рией), которая обеспечивает комбинацию физических, механических и функциональных характеристик, отличающихся от свойств исходного материала, из которого они изготовлены. Например, разработанные и смоделированные ауксетические мета-биоматериалы с отрицательным коэффициентом Пуассона и низким модулем Юнга обеспечили свойства, наиболее близкие к трабекулярной кости человека [59], где высокая жесткость традиционных материалов часто приводит к воспалению и отторжению [60].

При поглощении энергии сложнопрофильные металлические демпферы часто испытывают невосстановимые деформации в результате локального превышения предела текучести. Нитинол (NiTi) обеспечивает восстанавливаемую деформацию и рассеивание энергии благодаря своей уникальной сверхупругости, что может изменить подход к проектированию и аддитивному производству энергопоглощающих архитектурных мета-материалов [56]. При одноосном сжатии сетчатых конструкций в узлах образуются сверхэластичные шарниры, а мартенситное превращение постепенно распространяется от узла вдоль стоек.

Установлено, что изделия из сплава NiTi, изготовленные методом СЛС, могут проявлять эффекты сверхупругости при циклических нагрузках с относительно низким накоплением необратимой деформации (около 1,2 % после 11 циклов) [61], что делает эти изделия особенно подходящими для применений, требующих многократного восстановления формы.

Моделирование и проектирование изделий с функционально-градиентной структурой

Цифровое проектирование играет ключевую роль в создании изделий с функционально-градиентной структурой. Поскольку такие изделия обладают неоднородной внутренней структурой, их проектирование требует специально разработанных методик. Традиционные способы расширяются: теперь проектируется не только геометрия изделия из одного материала, но и его структура с учетом использования переменной структуры или нескольких материалов. Конечно-элементное моделирование продемонстрировало высокую точность прогнозирования механических изделий из жаропрочного сплава ЭИ961 (при интеграции СЛС и прямого лазерного выращивания). Похожие результаты были достигнуты для комбинации никелевого сплава ВЖ159 и медного сплава CuCr1Zr, однако авторы [62; 63] отметили необходимость дальнейшего совершенствования моделей для более точного учета особенностей переходных зон функционально-градиентных материалов. В работе [64] предложен инновационный подход к прогнозированию деформаций и внутренних напряжений при СЛС лопаток турбин и продемонстрировано, как создание предварительно деформированных моделей позволяет компенсировать ожидаемые коробления в готовых деталях. Неупругое поведение изделий с функционально-градиентной структурой исследовано в [65] с помощью калибровки парамет-

ров моделирования на основе экспериментальных образцов, что позволило добиться хорошей корреляции между прогнозируемыми и фактическими механическими свойствами. В [66] разработана методология моделирования механических свойств эндопротезов на основе изменения топологии решетчатых структур, определив оптимальные конфигурации для замены как кортикальной, так и трабекулярной костной ткани (рис. 6).

Для минимизации дефектов при изготовлении мультиматериалов методом СЛС и прогнозирования полученных свойств используют компьютерное моделирование процессов изготовления и эксплуатации [67–70]. В частности, это является важным при производстве изделий из сплавов, склонных к дефектообразованию, например NiTi [53]. В одном и другом случаях определяющим является процесс взаимодействия двух разнородных материалов. В работе [71] использовались термомеханические модели для моделирования остаточных напряжений в изделии из сплава Inconel 625. Авторы [72] разработали модель на основе клеточных автоматов для прогнозирования микроструктуры в процессе СЛС материалов с большими температурными градиентами и скоростью охлаждения.

Технологии искусственного интеллекта в аддитивном производстве

Для эффективного цифрового проектирования мультиматериалов, создаваемых методом аддитив-

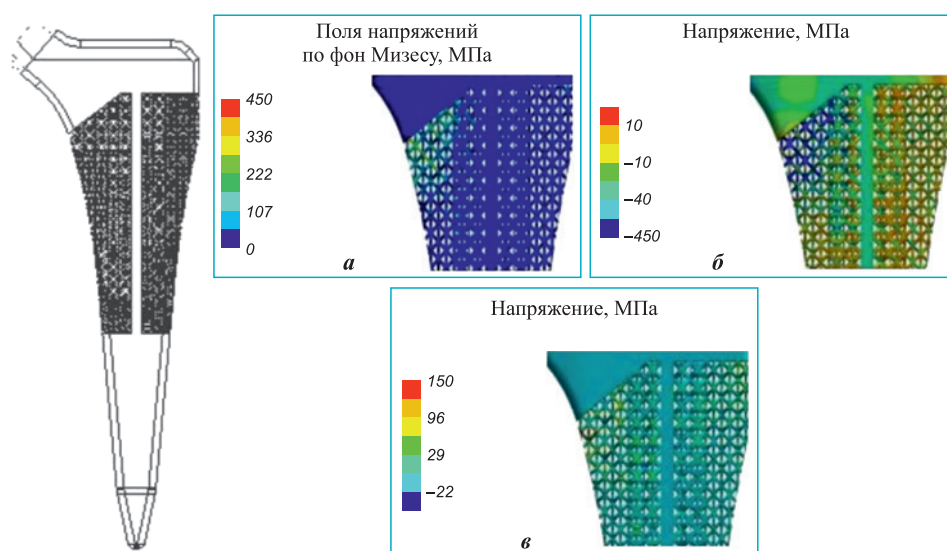


Рис. 6. Поля напряжений по фон Мизесу (а), поля максимальных растягивающих (б) и максимальных сжимающих (в) напряжений для эндопротеза с использованием градиентной структуры при наибольшей нагрузке [67]

Fig. 6. Von Mises stress fields (a), maximum tensile stress fields (b), and maximum compressive stress fields (c) for an endoprosthesis with a graded structure under maximum load [67]

ного производства, в настоящее время применяются современные программные решения, основанные на искусственном интеллекте [73]. Традиционные инструменты цифрового проектирования уже не справляются с задачами такого уровня, тогда как новые подходы позволяют максимально раскрыть возможности мультиматериальных изделий. В качестве примера можно привести компанию «Leap 71» (Объединенные Арабские Эмираты), которая разрабатывает изделия для производства методом СЛС с использованием собственного программного обеспечения на базе искусственного интеллекта PicoGK (рис. 7) [74].

Разработаны способы проектирования умных мультиматериалов [75; 76]. Например, в одном из исследований был применен эволюционный алгоритм проектирования изделий [77]. Это недетерминированный метод, использующий природоподобные подходы, основанные на естественном отборе и эволюции и на его основе возможно «создание более совершенных особей», соответствующих оцениваемым решениям, в рамках смены поколений. Помимо естественного отбора, основанного на приспособленности, иначе известного как «выживание сильнейших», для каждой задачи используются и адаптируются такие понятия, как мутация, рекомбинация и популяция, содержащие «родителей» и «детей». С помощью предложенной системы цифрового проектирования был рассмотрен вариант получения активного композита в виде простой консольной балки с мультиматериальным строением, которая под действием температуры изменяла свою форму.

Моделирование с использованием методов машинного обучения может быть применено для оптимизации параметров при производстве мульти-

материальных изделий методом СЛС [78]. Был разработан алгоритм на основе многомерного гауссовского процесса, который прогнозирует плотность и шероховатость поверхности детали в зависимости от таких параметров, как мощность лазера, скорость и расстояние между проходами. Обучающие данные для алгоритма собираются с помощью метода высокопроизводительных экспериментов. Созданные карты процессов позволяют наглядно оценить взаимосвязь между параметрами процесса и свойствами переходных зон мультиматериальных изделий. При этом параметры процесса оказываются нелинейной функцией состава, а настройки, подходящие для сплава 1 или сплава 2, не могут быть напрямую применены к переходным зонам.

Для повышения качества изготовления мультиматериалов методом СЛС можно использовать мониторинг процесса в реальном времени и корректировать параметры печати на основе анализа полученных данных [79; 80], где такие передовые технологии, как высокоскоростная и инфракрасная фотосъемка, позволяют собирать критические данные о размере и характеристиках ванны расплава, а машинное обучение открывает широкие возможности для анализа собранных данных. Было проведено исследование анализа сигналов акустических и оптических излучений, связанных с длиной волны лазера, при мониторинге процесса изготовления мультиматериалов из меди [81]. Для этого использовалась специализированная система мониторинга и классификации сигналов, основанная на контрастном глубоком обучении. Результаты исследования выявили выраженные различия в уровнях энергии для различных составов порошка, что указывает на разную динамику расплава. Также была подтверждена



Рис. 7. Примеры изделий, спроектированных в программном продукте PicoGK фирмы Leap 71 [74]

а – теплообменник, б – компоненты ракетного двигателя, в – трубчатый теплообменник

Fig. 7. Examples of parts designed using the PicoGK software developed by Leap 71 [74]

а – heat exchanger, б – rocket engine parts, в – tubular heat exchanger

эффективность интеграции контрастного обучения со стратегией использования нескольких датчиков для мониторинга процессов СЛС при производстве мультиматериалов.

Заключение

Изделия с функционально-градиентной структурой, созданные методом СЛС, представляют собой перспективное направление в современном материаловедении. Мультиматериальные системы с переменным составом демонстрируют значительное улучшение механических характеристик по сравнению с монокомпонентными материалами. При этом переходные зоны между различными сплавами играют ключевую роль в обеспечении надежности соединения, а оптимизация плотности энергии существенно снижает пористость в этих областях. Разработка метаматериалов с особой внутренней архитектурой обеспечивает им уникальные физические и механические характеристики, необходимые, например, для биомеханически совместимых имплантатов и эффективных энергопоглощающих конструкций.

Изделия с функционально-градиентной структурой и с эффектом памяти формы, в частности из сплава NiTi, созданные методом СЛС, показывают улучшенные функциональные свойства, а формирование направленной зеренной структуры и текстуры позволяет расширить зону сверхупругости и повысить стабильность эффекта памяти формы. Современные методы цифрового проектирования и моделирования позволяют с высокой точностью прогнозировать свойства таких изделий и оптимизировать параметры их производства, а внедрение технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для их проектирования, мониторинга процесса изготовления в реальном времени и оптимизации производственных параметров.

Таким образом, изделия с функционально-градиентной структурой, созданные методом СЛС, обладают значительным потенциалом для применения в аэрокосмической отрасли, медицине, робототехнике и других высокотехнологичных сферах, где требуются изделия с уникальным сочетанием свойств.

Список литературы / References

1. Miyamoto Y., Kaysser W.A., Rabin B.H., Kawasaki A., Ford R.G. Functionally graded materials: Design, processing and applications. *Springer Science & Business Media*. 2013;5:1–478.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5301-4>
2. Koizumi M. FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*. 1997;28(1-2):1–4.
[https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9)
3. Mahamood R.M., Akinlabi E.T. Functionally graded materials. Cham: Springer. 2017;103:1–214.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-53756-6>
4. Yang J., Gu D., Lin K., Zhang Y., Guo M., Yuan L., Zhang H., Zhang H. Laser additive manufacturing of bio-inspired metallic structures. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2022;1(1):100013.
<https://doi.org/10.1016/j.cmeaf.2022.100013>
5. Reichardt A., Shapiro A.A., Otis R., Dillon R.P., Borgogna J.P., McEnerney B.W., Hosemann P., Beese A.M. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials. *International Materials Reviews*. 2021;66(1):1–29.
<https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1747913>
6. Wang X., Xu S., Zhou S., Xu W., Leary M., Choong P., Qian M., Brandt M., Xie Y.M. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*. 2016;83:127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.01.012>
7. Ковальчук М.В. Первый российский кристаллографический конгресс. От конвергенции наук к природоподобным технологиям. *Кристаллография*. 2018;(2):173–175.
<https://doi.org/10.7868/S0023476118020017>
8. Kovalchuk M.V. The first Russian crystallographic congress. From convergence of sciences to nature-like technologies. *Crystallographiya*. 2018;(2):173–175. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0023476118020017>
9. Yaraghi N.A., Kisailus D. Biomimetic structural materials: Inspiration from design and assembly. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2018;69:23–57.
<https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040215-112621>
10. Su F.Y., Bushong E.A., Deerinck T.J., Seo K., Herrera S., Graeve O.A., Kisailus D., Lubarda A.V., McKittrick J. Spines of the porcupine fish: Structure, composition, and mechanical properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017;73:38–49.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.08.020>
11. Sullivan T.N., Pissarenko A., Herrera S.A., Kisailus D., Lubarda V.A., Meyers M.A. A lightweight, biological structure with tailored stiffness: The feather vane. *Acta Biomaterialia*. 2016;41:27–39.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.05.022>
12. Salinas C.L., de Obaldia E.E., Jeong C., Hernández J.J., Zavattieri P., Kisailus D. Enhanced toughening of the crossed lamellar structure revealed by nanoindentation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017;76:58–68.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.05.036>
13. Wegst U.G.K., Bai H., Saiz E., Tomsia A.P., Ritchie R.O. Bioinspired structural materials. *Nature Materials*. 2014;14(1):23–36.
<https://doi.org/10.1038/nmat4089>
14. Rawat P., Zhu D., Rahman M. Z., Barthelat F. Structural and mechanical properties of fish scales for the bio-inspired design of flexible body armors: A review. *Acta Biomaterialia*. 2021;121:41–67.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.11.040>

14. Yin S., Guo W., Wang H., Huang Y., Yang R., Hu Z., Chen D., Xu J., Ritchie R.O. Strong and tough bioinspired additive-manufactured dual-phase mechanical metamaterial composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2021;149:104321.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104321>
15. Tee Y.L., Tran P. On bioinspired 4D printing: materials, design and potential applications. *Journal of the Institution of Engineers, Australia*. 2021;19(5):642–652.
<https://doi.org/10.1080/14484846.2021.1988434>
16. Yang Y., Song X., Li X., Chen Z., Zhou C., Zhou Q., Chen Y. Recent progress in biomimetic additive manufacturing technology: From materials to functional structures. *Advanced Materials*. 2018;30(36):1706539.
<https://doi.org/10.1002/adma.201706539>
17. Li W., Pei Y., Zhang C., Kottapalli A.G.P. Bioinspired designs and biomimetic applications of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*. 2021;84:105865.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105865>
18. Brulé V., Rafsanjani A., Asgari M., Western T.L., Pasini D. Three-dimensional functional gradients direct stem curling in the resurrection plant *Selaginella lepidophylla*. *Journal of The Royal Society Interface*. 2019;16(159):20190454.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0454>
19. Du Plessis A., Broeckhoven C., Yadroitsava I., Yadroitsev I. Beautiful and functional: A review of biomimetic design in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2019;27:408–427.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.033>
20. Pathak S. Biomimicry: (Innovation Inspired by Nature). *International Journal of New Technology and Research*. 2019;5(6):1–8.
<https://doi.org/10.31871/IJNTR.5.6.17>
21. Nazari K., Tran P., Tan P., Ghazlan A., Ngo T.D., Xie Y.M. Advanced manufacturing methods for ceramic and bioinspired ceramic composites: A review. *Open Ceramics*. 2023;15:100399.
<https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100399>
22. Zhang B., Han Q., Zhang J., Han Z., Niu S., Ren L. Advanced bio-inspired structural materials: Local properties determine overall performance. *Materials Today*. 2020;41:177–199.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.016>
23. Ahamed M.K., Wang H., Hazell P.J. From biology to biomimicry: Using nature to build better structures. A review. *Construction and Building Materials*. 2022;320:126252.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126252>
24. Popovich V.A., Borisov E.V., Popovich A.A., Sufiarov V.S., Masaylo D.V., Alzina L. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties. *Materials & Design*. 2017;114:441–449.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.075>
25. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Масайло Д.В., Григорьев А.В. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2016;(3):4–11.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11>
- Popovich A.A., Sufiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017;58:389–395.
<https://doi.org/10.3103/S1067821217040149>
26. Popovich V.A., Borisov E.V., Popovich A.A., Sufiarov V.S., Masaylo D.V., Alzina L. Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting. *Materials & Design*. 2017;131:12–22.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.065>
27. Ghorbanpour S., Sahu S., Deshmukh K., Borisov E., Riemsag T., Reinton E., Bertolo V., Jiang Q., Popovich A., Shamshurin A., Knezevic M., Popovich V. Effect of microstructure induced anisotropy on fatigue behaviour of functionally graded Inconel 718 fabricated by additive manufacturing. *Materials Characterization*. 2021;179:111350.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111350>
28. Ghorbanpour S., Deshmukh K., Sahu S., Riemsag T., Reinton E., Borisov E., Popovich A., Bertolo V., Jiang Q., Sanchez M.T., Knezevic M., Popovich V. Additive manufacturing of functionally graded Inconel 718: Effect of heat treatment and building orientation on microstructure and fatigue behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;306:117573.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117573>
29. Bandyopadhyay A., Heer B. Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018;129:1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>
30. Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A. Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;6(1):4.
<https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
31. Wang D., Liu L., Deng G., Deng C., Bai Y., Yang Y., Wu W., Chen J., Liu Y., Wang Y., Lin X., Han C. Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(2):329–365.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2051531>
32. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Шамшурин А.И. Создание мульти-материальных образцов системы ВЖ159–BrXЦrT методом селективного лазерного плавления. *Глобальная энергия*. 2023;29(2):175–188. <https://doi.org/10.18721/JEST.29212>
Reprin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Shamshurin A.I. Creating multi-material samples of the system EI1319–BrCrCrTi by selective laser melting. *Global Energy*. 2023;29(2):175–188. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18721/JEST.29212>
33. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Голубков Н.А. Исследование механических свойств мульти-материальных образцов системы ВЖ159–BrXЦrT, полученных методом селективного лазерного плавления. *Известия вузов. Порошковая металлургия и*

функциональные покрытия. 2024;18(1):52–61.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Golubkov N.A. Mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr alloy multi-material samples manufactured by selective laser melting. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(1):52–61.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

34. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А. Исследование мультиматериальных образцов с трехмерным изменением состава, полученных методом селективного лазерного плавления. *Глобальная энергия*. 2024;30(4):37–52.

<https://doi.org/10.18721/JEST.30403>

Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Investigation of multi-material samples with three-dimensional composition change obtained by selective laser melting method. *Global Energy*. 2024;30(4):37–52. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18721/JEST.30403>

35. Borisov E., Repnin A., Popovich A. Investigation of AlSi10Mg alloy composition modification by Cu addition in selective laser melting. In: *The International Conference “Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology”* (Samarkand, 23–26 September 2024). AIP Conference Proceedings, 2025; 3562 (1):010001.
36. Borisov E., Polozov I., Starikov K., Popovich A., Sufiarov V. Structure and properties of Ti/Ti64 graded material manufactured by laser powder bed fusion. *Materials (Basel)*. 2021;14(20):6035.
<https://doi.org/10.3390/ma14206035>
37. Repnin A., Borisov E., Popovich A., Shamshurin A. Fracture toughness of Ti6Al4V/Cp-Ti multi-material produced via selective laser melting. *Metals*. 2023;13(10):1738.
<https://doi.org/10.3390/met13101738>
38. Repnin A., Borisov E., Maksimov A., Rozhkova D., Popovich A. Investigation of the 4D multi-material 316L/FeNi36 obtained by selective laser melting. *Micromachines*. 2024;15(11):1288.
<https://doi.org/10.3390/mi15111288>
39. Repnin A., Borisov E., Popovich A. Investigation of Inconel 718/Ti6Al4V Multi-material obtained by selective laser melting with transition layer. In: *The International Conference “Advanced Mechanics: Structure, Materials, Tribology”* (Samarkand, 23–26 September 2024). AIP Conference Proceedings, 2025; 3562 (1):050005.
40. Repnin A., Borisov E., Popovich A. Formation of the Cu + Nb interlayer in the inconel 718/Ti6Al4V multi-material obtained by selective laser melting. *Materials*. 2024;17(23):5801.
<https://doi.org/10.3390/ma17235801>
41. Repnin A., Kim A., Popovich A. Interfacial characterization of selective laser melting of a SS316L/NiTi multi-material with a high-entropy alloy interlayer. *Crystals*. 2023;13(10):1486.
<https://doi.org/10.3390/cryst13101486>
42. Demir A.G., Previtali B. Multi-material selective laser melting of Fe/Al–12Si components. *Manufacturing Letters*. 2017;11:8–11.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.01.002>

43. Wei K., Zeng X., Li F., Liu M., Deng J. Microstructure and mechanical property of Ti–5Al–2.5Sn/Ti–6Al–4V dissimilar titanium alloys integrally fabricated by selective laser melting. *Journal of Metals*. 2020;72(3):1031–1038.
<https://doi.org/10.1007/s11837-020-04045-3>
44. Scaramuccia M.G., Demir A.G., Caprio L., Tassa O., Previtali B. Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718. *Powder Technology*. 2020;367:376–389.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.010>
45. Liu X., Liu Z., Liu Y., Zafar Z., Lu Y., Wu X., Jiang Y., Xu Z., Guo Z., Li S. Achieving high strength and toughness by engineering 3D artificial nacre-like structures in Ti6Al4V-Ti metallic composite. *Composites Part B: Engineering*. 2022;230:109552.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109552>
46. Peng Y., Shi Y., Jin T., Ren J., Bian Y. Structural design, interfacial behavior and mechanical properties of bimetallic nacre-like structures by laser powder-bed fusion. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;990:174470.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.174470>
47. Chueh Y.H., Hsieh B.Y., Shih A.J. Interfacial characteristics in multi-material laser powder bed fusion of CuZr/316L stainless steel. *CIRP Annals*. 2024;73(1):145–148.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.03.012>
48. Costa M.M., Lima R., Alves N., Silva N.A., Gasik M., Silva F.S., Bartolomeu F., Miranda G. Multi-material cellular structured orthopedic implants design: *In vitro* and bio-tribological performance. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022;131:105246.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105246>
49. Chen K., Wang C., Hong Q., Wen S., Zhou Y., Yan C., Shi Y. Selective laser melting 316L/CuSn10 multi-materials: Processing optimization, interfacial characterization and mechanical property. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116711.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116711>
50. Zhang M., Yang Y., Xu M., Chen J., Wang D. Mechanical properties of multi-materials porous structures based on triply periodic minimal surface fabricated by additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2021;27(9):1681–1692. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0153>
51. Gracheva A., Polozov I., Popovich A. Additive manufacturing of biodegradable metallic implants by selective laser melting: Current research status and application perspectives. *Metals*. 2025;15(7):754.
<https://doi.org/10.3390/MET15070754>
52. Tsaturyants M., Sheremetyev V., Dubinskiy S., Komarov V., Polyakova K., Korotitskiy A., Prokoshkin S., Borisov E., Starikov K., Kaledina D., Popovich A., Brailovskiy V. Structure and properties of Ti–50.2Ni alloy processed by laser powder bed fusion and subjected to a combination of thermal cycling and heat treatments. *Shape Memory and Superelasticity*. 2022;8(1):16–32.
<https://doi.org/10.1007/s40830-022-00362-5>
53. Zhu J.N., Borisov E., Liang, X., Farber E., Hermans M.J.M., Popovich V.A. Predictive analytical modeling and experimental validation of processing maps in additive manufacturing of nitinol alloys. *Additive Manufacturing*. 2021;38:101802.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101802>

54. Borisov E., Starikov K., Popovich A., Tihonovskaya T. Investigation of the possibility of tailoring the chemical composition of the NiTi alloy by selective laser melting. *Metals*. 2021;11(9):1470.
<https://doi.org/10.3390/met11091470>
55. Zhu J. N., Borisov E., Liang X., Huizenga R., Popovich A., Bliznuk V., Petrov R., Hermans M., Popovich V. Controlling microstructure evolution and phase transformation behavior in additive manufacturing of nitinol shape memory alloys by tuning hatch distance. *Journal of Materials Science*. 2022;57(10):6066–6084.
<https://doi.org/10.1007/s10853-022-07043-9>
56. Yan Z., Zhu J.N., Borisov E., Riemsag T., Scott S.P., Hermans M., Jovanova J., Popovich V. Superelastic response and damping behavior of additively manufactured Nitinol architected materials. *Additive Manufacturing*. 2023;68:103505.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103505>
57. Zhu J.N., Liu K., Riemsag T., Tichelaar F.D., Borisov E., Yao X., Popovich A., Huizenga R., Hermans M., Popovich V. Achieving superelasticity in additively manufactured Ni-lean NiTi by crystallographic design. *Materials & Design*. 2023;230:111949.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111949>
58. Zhu J.N., Zhu W., Borisov E., Yao X., Riemsag T., Goulas C., Popovich A., Yan Z., Tichelaar F.D., Mainali D.P., Hermans M., Popovich V. Effect of heat treatment on microstructure and functional properties of additively manufactured NiTi shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;967:171740.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171740>
59. Farber E., Orlov A., Popovich A. Auxetic meta-biomaterials: Computer simulation and experimental results. *Metals*. 2025;15(3):241. <https://doi.org/10.3390/met15030241>
60. Farber E., Orlov A., Popovich A. Effect of lattice structures topology on the properties of the TiNi alloy: Computer simulation. *Prospects*. 2021;1:3.
61. Farber E., Orlov A., Borisov E., Repnin A., Kuzin S., Golubkov N., Popovich A. TiNi alloy lattice structures with negative Poisson's ratio: computer simulation and experimental results. *Metals*. 2022;12(9):1476.
<https://doi.org/10.3390/met12091476>
62. Orlov A., Repnin A., Farber E., Borisov E., Popovich A. Fabrication of multi-material samples from nickel and copper alloys by selective laser melting: Computer simulation and experimental results. *AIP Conference Proceedings*. 2024;3154(1):020028.
<https://doi.org/10.1063/5.0201286>
63. Orlov A., Masaylo D., Igoshin S., Razumov N., Popovich A. Mechanical properties prediction of the materials gained by combining additive technologies. *Materials Today: Proceedings*. 2020;30:752–755.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.563>
64. Orlov A., Borisov E., Popovich A.A. Numerical simulation of the selective laser melting process using the example of a turbine blade. *Materials Science Forum*. 2020;989:850–855.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.850>
65. Orlov A.V., Sufiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Popovich A.A., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mikhaleuk, D.S. Numerical simulation of the inelastic behavior of a structurally graded material. *Letters on Materials*. 2019;9(1):97–102.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-1-97-102>
66. Sufiarov V.S., Orlov A.V., Borisov E.V., Sokolova V.V., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mikhaleuk A.A., Popovich A.A. Modeling the mechanical properties of lattice structures made by selective laser melting. *Letters on Materials*. 2020;10(2):123–128.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-123-128>
67. Sufiarov V.S., Orlov A.V., Borisov E.V., Sokolova V.V., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mikhaleuk D.S., Popovich A.A. Design and mechanical properties simulation of graded lattice structures for additive manufacturing endoprostheses. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2021;28(16):1656–1662.
<https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1680701>
68. Sorkin A., Tan J.L., Wong C.H. Multi-material modelling for selective laser melting. *Procedia Engineering*. 2017;216:51–57.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.084>
69. Küng V.E., Scherr R., Markl M., Körner C. Multi-material model for the simulation of powder bed fusion additive manufacturing. *Computational Materials Science*. 2021;194:110415.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110415>
70. Tang C., Yao L., Du H. Computational framework for the simulation of multi material laser powder bed fusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;191:122855.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122855>
71. Wang Z., Denlinger E., Michaleris P., Stoica A.D., Ma D., Beese A.M. Residual stress mapping in Inconel 625 fabricated through additive manufacturing: Method for neutron diffraction measurements to validate thermo-mechanical model predictions. *Materials & Design*. 2017;113:169–177.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.003>
72. Ao X., Xia H., Liu J., He Q. Simulations of microstructure coupling with moving molten pool by selective laser melting using a cellular automaton. *Materials & Design*. 2020;185:108230.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108230>
73. Miao H., Yusof F., Karim M.S.A., Badruddin I.A., Hussien M., Kamangar S., Zhang H. Process parameter optimisation for selective laser melting of AlSi10Mg-316L multi-materials using machine learning method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;129(7): 3093–3108.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12489-5>
74. Gallery LEAP 71. URL: <https://leap71.com/gallery/> (Accessed: 01.10.2020).
75. Athinarayanarao D., Prod'hon R., Chamoret D., Qi H.J., Bodaghi M., André J.C., Demoly F. Computational design for 4D printing of topology optimized multi-material active composites. *Computational Materials*. 2023;9(1):1–9.
<https://doi.org/10.1038/s41524-023-00997-7>
76. Benyahia K., Seriket H., Prod'hon R., Gomes S., Andr J.C., Qi H.J., Demoly F. A computational design approach for multi-material 4D printing based on interlocking blocks assembly. *Additive Manufacturing*. 2022;58:102993.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102993>

77. Salonitis K., Chantzis D., Kappatos V. A hybrid finite element analysis and evolutionary computation method for the design of lightweight lattice components with optimized strut diameter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9–12):2689–2701. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9528-x>
78. Rankouhi B., Jahani S., Pfefferkorn F. E., Thoma D.J. Compositional grading of a 316L-Cu multi-material part using machine learning for the determination of selective laser melting process parameters. *Additive Manufacturing*. 2021; 38:101836. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101836>
79. Zhu Z., Ng D.W.H., Park H.S., McAlpine M.C. 3D-printed multifunctional materials enabled by artificial-intelligence-assisted fabrication technologies. *Nature Reviews Materials*. 2020;6(1):27–47. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00235-2>
80. Ibrahim Z.E., Linda I., Omer M., Kamran K., Andreas S.. Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2024:146833. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146833>
81. Pandiyan V., Baganis A., Axel Richter R., Wróbel R., Leinenbach C. Qualify-as-you-go: sensor fusion of optical and acoustic signatures with contrastive deep learning for multi-material composition monitoring in laser powder bed fusion process. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024;19(1):e2356080. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2356080>

Сведения об авторах



Евгений Владиславович Борисов – к.т.н., вед. науч. сотрудник лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

ORCID: 0000-0003-2464-6706

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

Арсений Вячеславович Репнин – инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций», СПбПУ

ORCID: 0009-0001-3157-3317

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

Анатолий Анатольевич Попович – д.т.н., профессор, директор Института машиностроения, материалов и транспорта, СПбПУ

ORCID: 0000-0002-5974-6654

E-mail: popovicha@mail.ru

Information about the Authors

Evgenii V. Borisov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Laboratory “Synthesis of New Materials and Structures”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

ORCID: 0000-0003-2464-6706

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

Arseniy V. Repnin – Engineer of Laboratory “Synthesis of New Materials and Structures”, SPbPU

ORCID: 0009-0001-3157-3317

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

Anatoliy A. Popovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Machinery, Materials, and Transport, SPbPU

ORCID: 0000-0002-5974-6654

E-mail: popovicha@mail.ru

Вклад авторов



Е. В. Борисов – написание статьи, участие в обсуждении результатов.

А. В. Репнин – обработка полученных результатов, написание статьи.

А. А. Попович – концептуализация идеи, определение цели работы и ее задачи, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the Authors

E. V. Borisov – manuscript writing, participation in the discussion of results.

A. V. Repnin – data processing, manuscript writing.

A. A. Popovich – conceptualization of the idea, definition of the study's aim and objectives, participation in the discussion of results.

Статья поступила 03.04.2025 г.
Доработана 19.05.2025 г.
Принята к публикации 22.05.2025 г.

Received 03.04.2025
Revised 19.05.2025
Accepted 22.05.2025