

УДК 621.763; 621.7.04

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-28-43

Исследование свойств регулярных структур, полученных аддитивными технологиями в сочетании с методами порошковой металлургии*

Ю.И. Гордеев¹, А.С. Бинчуров¹, Е.В. Москвичев², Г.М. Зеер¹,
Е.Г. Зеленкова¹, В.Б. Ясинский¹, С.В. Филиппов¹, Е.В. Герасимов¹

¹ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий

Investigation of properties of the regular structures obtained by additive technologies in combination with the powder metallurgy methods

Y.I. Gordeev¹, A.S. Binchurov¹, E.V. Moskvichev², G.M. Zeer¹,
E.G. Zelenkova¹, V.B. Yasinskiy¹, S.V. Filippov¹, E.V. Gerasimov¹

¹ Siberian Federal University FSAEI of HE

² Federal Research Center for Information and Computing Technologies

Несмотря на значительное количество исследований и прикладных работ в области аддитивных технологий, проблемы топологической оптимизации структур, полученных совмещением методов 3D-печати и порошковой металлургии, остаются недостаточно изученными как теоретически, так и экспериментально. Результаты моделирования регулярных структур из пластиков и изучения процессов их разрушения можно эффективно использовать в качестве стартового метода при разработке технологии изготовления композиционных материалов на основе титановых сплавов с повышенным уровнем прочностных свойств. По результатам численных экспериментов и натурных испытаний определены наиболее предпочтительные типы структур — сотовые на основе полилактида (PLA) со следующими прочностными свойствами: модуль упругости — 342,3 МПа; предел прочности при сжатии — 20,4 МПа; удельная прочность — 81 МПа·см³/г. Реализованные на пластиках 3D-модели использованы при изготовлении металлокомпозиатов по технологии, сочетающей селективное лазерное плавление и порошковую металлургию. Помимо повышения плотности и устранения пористости у структур из порошков титанового сплава после инфильтрации более легкоплавкими сплавами возрастает уровень прочностных свойств вследствие перераспределения напряжений, возникающих в титановом каркасе под нагрузкой. Прочность на изгиб изменяется в диапазоне 1140...1560 МПа, модуль упругости — в интервале 49 500...54 000 МПа в зависимости от состава композита и режимов селективного лазерного плавления. Твердость по Роквеллу возрастает от 35 до 45 HRC, твердость по Бринеллю — от 340 до 410 НВ, что на 20...25 % больше, чем твердость проката из сплава ВТ6. Повышенную прочность можно объяснить композиционной структурой материала, образованного сочетанием двух взаимно проникающих каркасов. Результаты испытаний образцов на прочность являются еще одним аргументом в пользу предложенного способа инфильтрации при совместном использовании аддитивных технологий и методов порошковой металлургии.

* Механические испытания проведены в Инженерно-испытательном центре ФИЦ ИВТ, электронно-микроскопические исследования — в лаборатории электронной микроскопии ЦКП СФУ.

Ключевые слова: метод послойного наплавления, селективное лазерное плавление, регулярные структуры, удельная прочность, инфильтрация сплавами, металлокомпозиты

Despite significant amount of research and applied works in the additive technologies, problems of the topological optimization of structures obtained by combining 3D printing and the powder metallurgy methods remain insufficiently studied both theoretically and experimentally. Results of simulating regular structures made of plastics and studying their destruction processes could be effectively used as a starting approach in developing technology for production of the composite materials based on the titanium alloys with the increased level of strength properties. Based on numerical experiments and full-scale tests, the most preferred types of structures were determined. They include honeycomb structures based on PLA with the following strength properties: elastic modulus — 342.3 MPa; ultimate compressive strength — 20.4 MPa; specific strength — 81 MPa cm³/g. 3D models realized on plastics were used in manufacture of the metal composites using technology combining selective laser melting and powder metallurgy. In addition to increasing density and eliminating porosity of structures made from the titanium alloy powders, the strength properties level also increases after infiltration with the lower-melting alloys, since redistribution of stresses arising in the titanium frame under load is ensured. Bending strength alters in the range of 1140...1560 MPa and elastic modulus - in the range of 49 500...54 000 MPa depending on the composite composition and selective laser melting modes. Rockwell hardness increases from 35 to 45 HRC, and Brinell hardness — from 340 to 410 HB, which is by 20...25 % higher than hardness of the rolled products from the VT6 alloy. The increased strength values could be explained by the material composite structure formed by combination of the two mutually penetrating frames. Results of testing samples for strength are another argument in favor of the proposed infiltration method implying combined additive and powder metallurgy methods.

Keywords: layered melting method, selective laser melting, regular structures, specific strength, infiltration with alloys, metal composites

Аддитивные технологии, в частности методы 3D-печати (Fused Deposition Modeling — FDM), Selective Laser Melting — SLM), Selective Laser Sintering — SLS и др.), имеют преимущества перед порошковой металлургией, тканевыми и плетеными препрегами, вспениванием, литьем по выплавляемым моделям и другими традиционными методами изготовления изделий.

Появляется возможность получения сложных пространственных структур с беспрецедентными геометрическими характеристиками и высокой производительностью в соответствии с компьютерной моделью. С помощью методов 3D-печати можно формировать так называемые решетчатые структуры, имеющие архитектуру с повторением правильных геометрических ячеек в пространстве (стохастических и регулярных).

Применение решетчатых структур обеспечивает полимерным, металлическим и керамическим материалам сочетание свойств, недостижимое традиционными методами: повышенные значения удельной прочности, удельной поверхности, коэффициента теплопе-

редачи, модуля упругости и др. Как результат, расширенные перспективы применения указанных материалов для изготовления сложнопрофильных деталей для нужд машиностроения [1], аэрокосмической [2, 3] и нефтегазовой отраслей, биомедицины [4] и др.

В ряде работ приведены данные о влиянии состава и структуры расположения слоев на физико-механические свойства и предложены варианты топологической оптимизации поверхностей типа гироида [5, 6] и сотовых конструкций [7] для получения изделий различного назначения с заданными при проектировании свойствами.

В работах [8, 9] даны примеры практического применения метода FDM при создании сложноконтурных цельных деталей из пластика, металлов и сплавов.

В области аддитивных технологий также разработаны другие способы повышения плотности и прочности материалов, получаемых методами 3D-печати (SLM, SLS) [10]. В связи с этим представляют интерес системы аддитивного производства смешанного типа, где техно-

логии 3D-печати совмещены с методами порошковой металлургии.

Перспективным направлением расширения области применения композиционных материалов (КМ) является изготовление методом SLM слоистых конструкций, например сталь — медь [11]. Однако создание таких сэндвич-структур требует использования более сложного и дорогостоящего оборудования.

Металлические композиции на основе сталей [12, 13–18], инконелей [19–22], меди [23, 24], титана и его сплавов [25, 26], твердых сплавов [27–29] и других материалов также можно создавать, сочетая технологию 3D-печати с нанесением промежуточного жидкого слоя связующего между слоями основного материала. Однако в некоторых случаях к изделиям предъявляют повышенные требования по плотности и прочности, а наличие связующего приводит к остаточной пористости и необходимости дополнительной обработки.

В качестве таких методов и технологий используют удаление порошка связующего низкотемпературным отжигом [30, 31], спеканием [23] и горячим изостатическим прессованием [32, 33]. Ликвидировать остаточную пористость в материалах, полученных методом послойного наплавления, можно инфльтрацией, т. е. пропиткой расплавом другого, более легкоплавкого материала [5, 23, 34].

Несмотря на значительное количество исследований и прикладных работ в области аддитивных технологий [1], проблемы топологической оптимизации структур, полученных методами 3D-печати, по-прежнему остаются актуальными. Это связано с необходимостью их адаптации к форме, размерам и условиям эксплуатации конкретного изделия, а моделирование деталей сложной пространственной конфигурации требует дальнейшего совершенствования и развития.

Кроме того, топологическая оптимизация на прототипах из пластика позволяет сократить объем экспериментальных исследований и ускорить процедуру последующей трансформации и адаптации применительно к конструкциям из металлов и сплавов. В итоге повышается эффективность определения функциональных взаимосвязей в системе *топологическая структура — состав — технологический процесс — микроструктура материала — свойства*.

Цель работы — моделирование регулярных структур из пластиков и изучение процессов их

разрушения в качестве стартового метода при разработке технологии изготовления КМ на основе титановых сплавов с повышенным уровнем прочностных свойств.

Методика проведения исследований. Предварительную экспериментальную оценку прочностных свойств проводили на образцах десяти различных типов структур, изготовленных из пластиков — акрилонитрил бутадиен стирола (ABS) и полилактида (PLA). При реализации технологии FDM-печати трехмерная цифровая модель в формате STL делится на слои, ориентируется наиболее подходящим образом для печати и генерируется в G-code.

В нем закладываются все параметры печати, перемещения экструдера, при необходимости формируются поддерживающие структуры. Изделие или модель производится выдавливанием (экструзией) и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

В процессе печати экструдер FDM-принтера перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло движется по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования (рис. 1, а).

С помощью метода FDM на принтере Hercules изготавливали образцы размером 40×40×40 мм с ячейками размером 1...5 мм (крупная сота) для испытания на сжатие. Образцы из пластиков ABS плотностью $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ и PLA плотностью $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$ получали при следующих технологических режимах: диаметр сопла экструдера — 0,5 мм; высота слоев — 0,35 мм; ширина нити — 0,8 мм; коэффициент подачи пластика — 0,98; температура экструдера — 205 °С; температура стола первого слоя — 65 °С; температура стола остальных слоев — 65 °С; скорость печати с формированием слоев и заполнением материала 20 % общего объема — 30 мм/с.

Образцы с сотовой структурой из порошков титанового сплава ВТ6 (для испытаний на изгиб и изготовления КМ с инфльтрацией сплавами на основе алюминия и бронзы) получали на оригинальной установке селективного лазерного плавления компании «Полихром» (г. Красноярск).

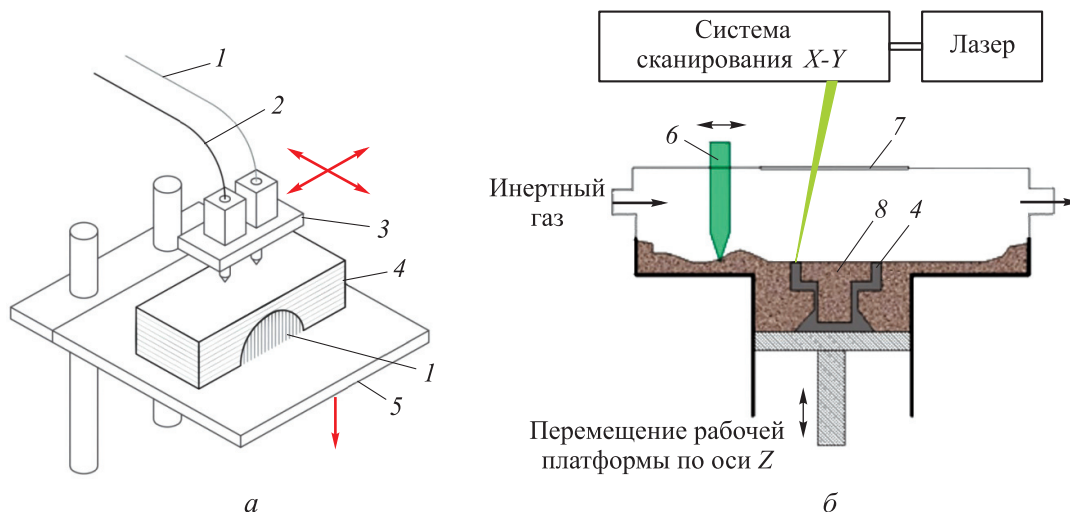


Рис. 1. Схемы установок для 3D-печати методами FDM (а) и SLM (б):
 1 — материал поддержки; 2 — основной материал; 3 — печатающая головка; 4 — деталь;
 5 — платформа; 6 — ракель; 7 — окно; 8 — порошок

Использованные в работе технология и аппаратура селективного лазерного плавления применяют для построения объектов сложной геометрической формы с возможностью комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте (полученных при создании прототипов из пластиков методом FDM). Схема установки для 3D-печати методом SLM показана на рис. 1, б.

Типы заполнения структуры образцов: гириды и соты с расположением слоев вдоль оси построения (роста) — продольные и по нормали — поперечные, что в дальнейшем соответствовало направлению нагрузки при сжатии. На плоскостях, подвергаемых нагружению, при печати формировались цельные (из сплошного материала) слои толщиной 0,35 мм.

Экспериментальную оценку прочностных свойств проводили на десяти образцах с различными типами структур, изготовленных из пластиков ABS и PLA. Характеристика образцов приведена в табл. 1.

Испытания на сжатие образцов выполняли согласно ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002) на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST с возможностью измерения деформаций видеоекстензометром. Удельную прочность рассчитывали с учетом того, что при заполнении материалом пластика 20 % общего объема плотность образцов для соты составляет 0,25 г/см³, а для гирида — 0,21 г/см³.

Для определения прочности на изгиб использовали универсальную испытательную машину Tinius Olsen H25KT. Размеры и форма

образцов на основе титанового сплава ВТ6 с алюминиевым или бронзовым связующим соответствовали ГОСТ 18228–94 (ISO 3325:1996): длина — 50 мм; ширина — 10,0 ± 0,1 мм; высота — 5,0 ± 0,1 мм. Твердость по Роквеллу измеряли на приборе ТП50-14 по шкале С при нагрузке 1500 Н в соответствии с ГОСТ 9013–59 (ISO 6508-86).

Определение плотности и расчет пористости образцов проводили по стандартной методике гидростатического взвешивания на аналитических весах Meteler Toledo EX205 с приставкой для гидростатического взвешивания.

Морфологию исходных порошков, микроструктуру и элементный состав полученных

Таблица 1

Характеристика образцов

| Образец | | Тип структуры |
|---------|----------|----------------------------------|
| Номер | Материал | |
| 1 | PLA1 | Поперечная сота |
| 2 | ABS1 | |
| 3 | PLA2 | Продольная сота |
| 4 | ABS2 | |
| 5 | PLA3 | Поперечный гирида |
| 6 | ABS3 | |
| 7 | PLA4 | Продольный гирида |
| 8 | ABS4 | |
| 9 | PLA5 | Поперечная сота (крупная ячейка) |
| 10 | ABS5 | |

образцов исследовали методами вторичных электронов и энергодисперсионного микроанализа с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7001F, оснащенного рентгеновским спектрометром Oxford Instruments INCA Penta FETx3.

Микроструктуру образцов изучали на полированных поверхностях с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7500FA. Для анализа структуры и характера поверхностей излома применяли микроскоп JAMP 9500F.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований регулярных структур из пластиков. На первой стадии исследований анализировали состояние проблемы и определяли

перспективные направления и конструкции регулярных структур для изготовления КМ. Предварительные численные расчеты по определению напряженно-деформированного состояния различных типов структур необходимы для сокращения объема натурных экспериментальных исследований.

При создании моделей различных сотовых и гироидных структур и прогнозировании их свойств использовали программные продукты Cura, Prusa и SolidWorks Simulation. Модели, топология образцов и результаты оценки максимальных перемещений e_{\max} и напряжений σ_{\max} , возникающих в объеме, приведены на рис. 2.

Анализ результатов численной оценки прочности различных типов структур показал, что

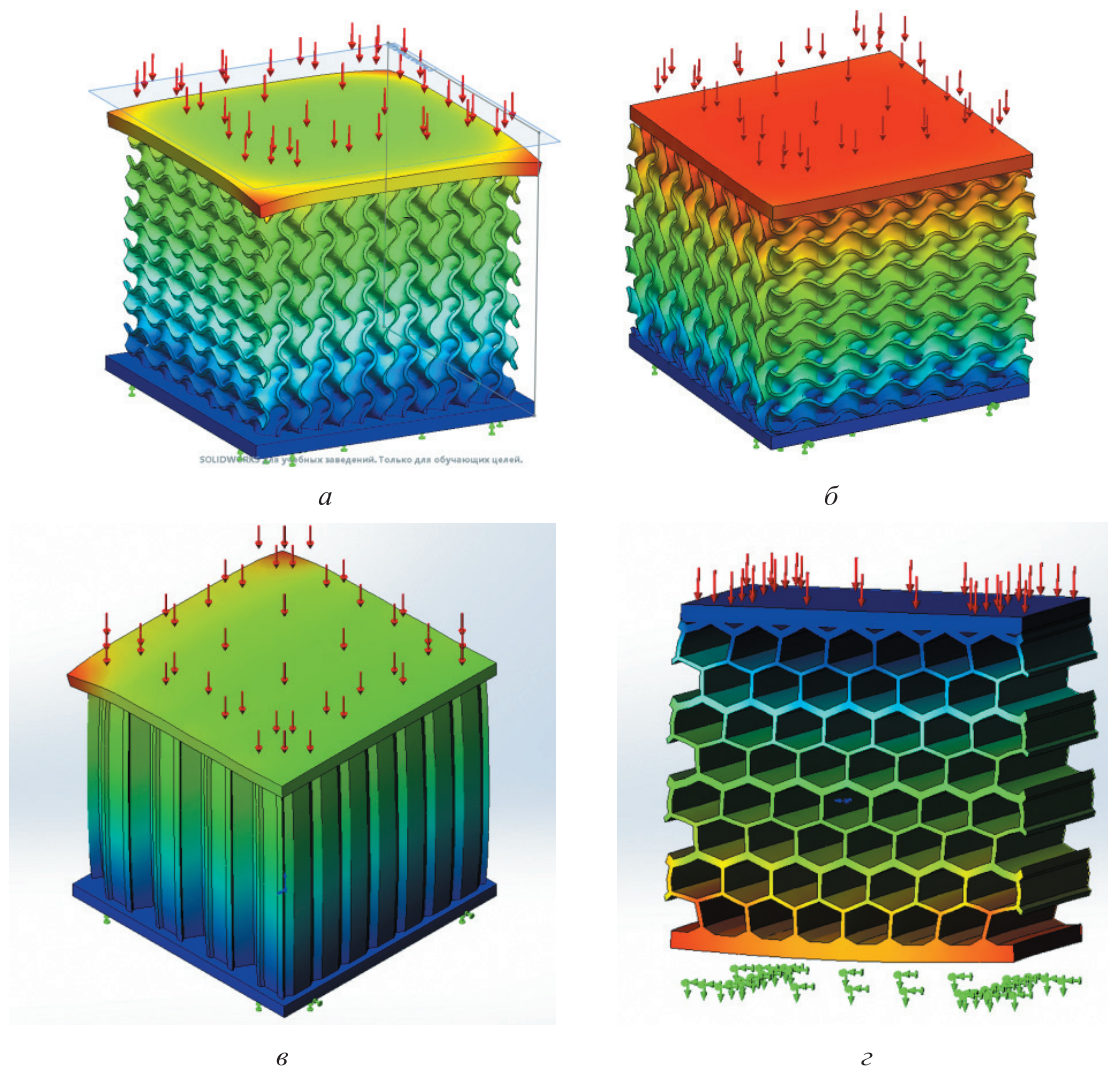


Рис. 2. Модели структур образцов:
 а — поперечного гироида ($e_{\max} = 0,4058$ мкм, $\sigma_{\max} = 64,23$ кПа); б — продольного гироида ($e_{\max} = 0,2126$ мкм, $\sigma_{\max} = 27,71$ кПа); в — продольной соты ($e_{\max} = 0,1624$ мкм, $\sigma_{\max} = 13,67$ кПа); г — поперечной соты ($e_{\max} = 0,4635$ мкм, $\sigma_{\max} = 26,41$ кПа)

продольное построение слоев предпочтительнее поперечного (35 %), а прочность сотовой структуры выше, чем у гироидной (75 %).

Экспериментальные диаграммы деформирования в координатах *нагрузка — перемещение*

и напряжение — деформация для образцов № 3 и 8 приведены на рис. 3.

Обращает на себя внимание, что деформационные процессы и характер разрушения большинства образцов с разной топологией

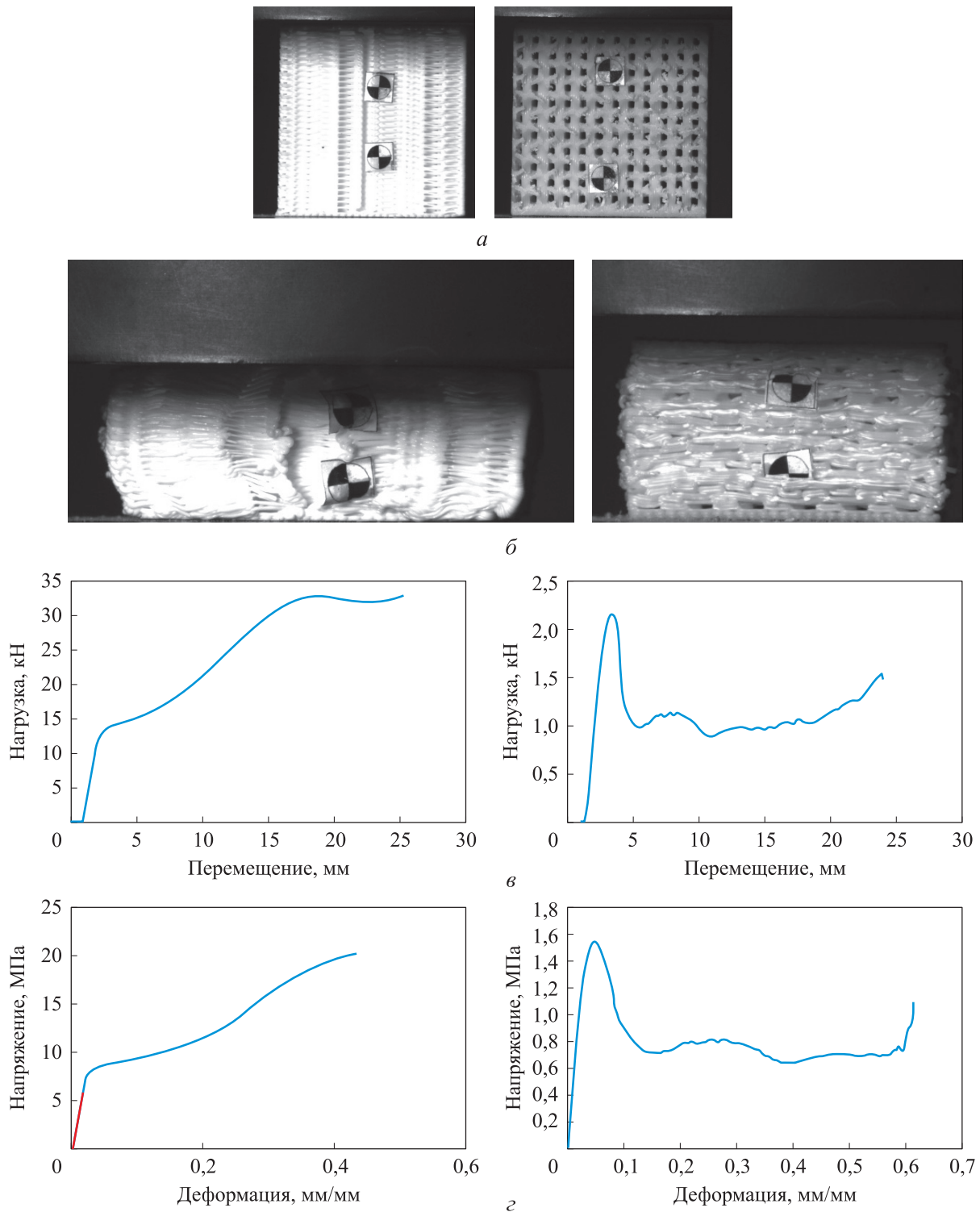


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования образцов № 3 (слева) и № 8 (справа): а — регулярные структуры образцов до нагружения; б — характер деформации образцов в процессе нагружения; в — зависимость нагрузки от перемещения; z — зависимость напряжения от деформации

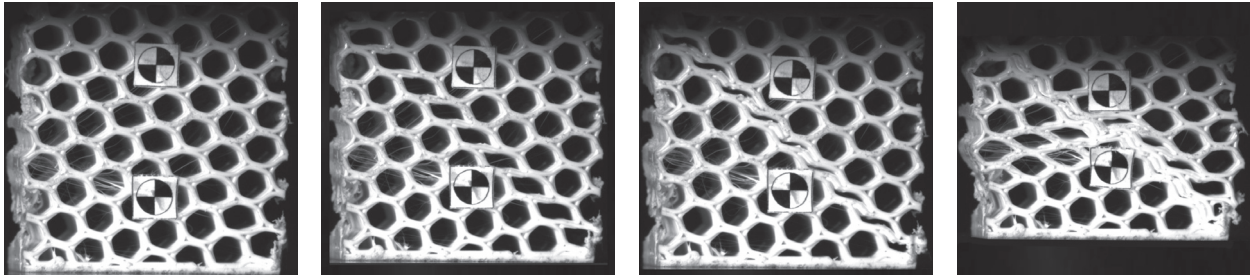


Рис. 4. Этапы разрушения стенок сотовой структуры в процессе нагружения

структур происходят в соответствии с прогнозами по модели и классическим представлениям о разрушении материалов, например по направлению плоскостей сдвига (рис. 4). Это свидетельствует о достаточно высоком качестве построения регулярных структур.

Более наглядное различие в поведении образцов под нагрузкой приведено на рис. 5, где номера кривых соответствуют номерам образцов. Видно, что наилучшими прочностными свойствами обладают образцы № 3 (PLA2), 4 (ABS2), 5 (PLA3) и 1 (PLA1). Немонотонный характер кривых свидетельствует о стадийности процессов разрушения большей части образцов.

Согласно рис. 5, наиболее предпочтительным материалом для изготовления каркасных структур является PLA, обеспечивающий для всех типов структур более высокий уровень прочностных свойств (кривые 1, 3, 5, 7, 9) по сравнению с образцами из ABS (кривые 2, 4, 6, 8, 10).

Сопоставление образцов с различной топологией показывает преимущество сотовых структур с расположением параллельно оси нагружения (см. рис. 5, кривые 3 и 4). Независимо от материала надежно воспринимаемые нагрузки для образцов из PLA и ABS лежат в диапазоне 10...25 кН, что является главным определяющим фактором.

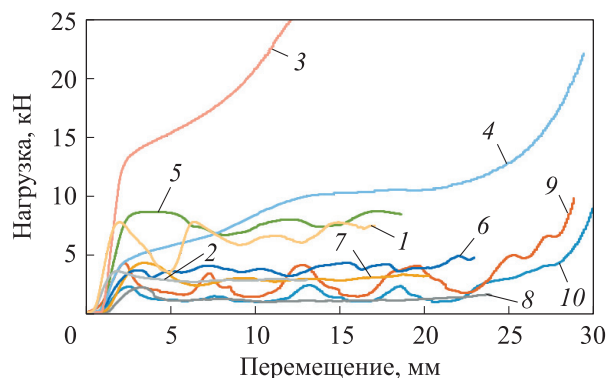


Рис. 5. Зависимости нагрузки от перемещения при сжатии образцов

Для образцов другой топологии (см. рис. 5, кривые 1 и 5), изготовленных из PLA, зона работоспособности составляет 5...10 кН. Кривые для остальных образцов имеют несущественные различия, максимальная воспринимаемая нагрузка не превышает 5 кН. Но их отличительной особенностью является ярко выраженная цикличность (дискретность) процессов разрушения и наличие многочисленных пиков, что объясняется слоистой структурой.

В работах [5, 35] описаны подобные эффекты для структур типа «гирийд» и «примитив Шварца». Авторы объясняют их тем, что каждый из пиков — экстремумов — соответствует разрушению одного из слоев ячеек, лежащих в плоскости, перпендикулярной оси нагружения. При этом за прочность образцов принимался первый пик на деформационной кривой, соответствующий переходу образца в область пластической деформации (со ссылкой на ГОСТ 4651–2014).

Для исследуемых структур такой подход не совсем корректен, так как каждый из многочисленных пиков на кривых соответствует постепенному «складыванию» стенок в соседних (наиболее напряженных) слоях образца по механизму упругопластических деформаций (необратимых по достижению пиковых напряжений на кривых, при которых наблюдается сброс нагрузки).

Дальнейший рост нагрузки и появление экстремумов на кривых относится к следующему этапу деформационных процессов других, очередных слоев структуры по оси сжатия (см. рис. 3 и 4). В то же время у кривых 3 и 4 (см. рис. 5) наблюдается более монотонный характер, схожий с поведением под нагрузкой пластичных материалов, что является их преимуществом отличием перед другими кривыми.

Анализ обработки результатов экспериментальных данных — физико-механические свойства полученных образцов (табл. 2) — показы-

Таблица 2

Физико-механические свойства полученных образцов

| Образец | | Модуль упругости, МПа | Предел прочности, МПа | Удельная прочность, МПа·см ³ /г |
|---------|----------|-----------------------|-----------------------|--|
| Номер | Материал | | | |
| 1 | PLA1 | 206,90 | 5,58 | 22,32 |
| 2 | ABS1 | 94,80 | 2,60 | 13,00 |
| 3* | PLA2 | 342,30 | 20,40 | 81,20 |
| 4 | ABS2 | 136,78 | 13,80 | 69,00 |
| 5 | PLA3 | 144,13 | 5,52 | 22,08 |
| 6 | ABS3 | 82,15 | 2,48 | 12,40 |
| 7 | PLA4 | 124,28 | 3,01 | 12,04 |
| 8 | ABS4 | 58,21 | 1,54 | 7,70 |
| 9 | PLA5 | 80,50 | 2,63 | 10,52 |
| 10 | ABS5 | 42,90 | 1,38 | 6,90 |

* Образец с наилучшими прочностными свойствами.

вает, что наиболее предпочтительной структурой является продольная сота и материал PLA (образец № 3), обеспечивающие наилучшее сочетание упругих и прочностных свойств.

Достигнутый уровень по удельной прочности сопоставим с результатами других исследователей [5, 8], но превышает их по предельной воспринимаемой нагрузке до разрушения (почти в 2 раза).

Кроме того, результаты экспериментальных исследований показывают удовлетворительное совпадение с прогнозом по модели, что позволяет рекомендовать методику создания моделей из пластика с помощью программ Cura, Prusa и SolidWorks Simulation для дальнейшего применения на практике при изготовлении изделий из металлических порошков.

Согласно результатам численных оценок и экспериментальных испытаний, наиболее предпочтительными оказались сотовые структуры на основе PLA со следующими прочностными свойствами: модуль упругости $E = 342,3$ МПа; предел прочности при сжатии $\sigma = 20,4$ МПа; удельная прочность $\sigma_{уд} = 81$ МПа·см³/г (при заполнении материалом пластика 20 и 21 % общего объема для сотовой и гироидной структуры соответственно).

Такой тип топологии сотовой структуры можно рекомендовать для дальнейшей реализации в конструкциях различного назначения,

в том числе из металлических материалов и сплавов. В частности, полученные для пластиков результаты использованы при изготовлении регулярных сотовых структур (с оптимальной топологией) из порошков титанового сплава ВТ6.

Экспериментальные исследования сотовых структур на основе титановых сплавов. Анализ результатов измерений прочности на изгиб образцов из титанового сплава, полученных методом SLM, свидетельствует о достаточно высоких значениях модуля упругости (39 226 МПа) и предела прочности (1257 МПа). Однако наличие остаточной пористости не позволяет добиться уровня свойств проката из титанового сплава.

Поэтому в дальнейшем исследовали возможности повышения физико-механических свойств сотовых структур из титанового сплава за счет дополнительных технологий инфильтрации расплавами на основе алюминия и меди.

В результате предварительных испытаний образцов сотовых структур на основе пластиков ABS и PLA определены наиболее предпочтительные типы структур с наилучшими прочностными свойствами. Поэтому компьютерные модели именно этих структур использовались для изготовления образцов из титаново-

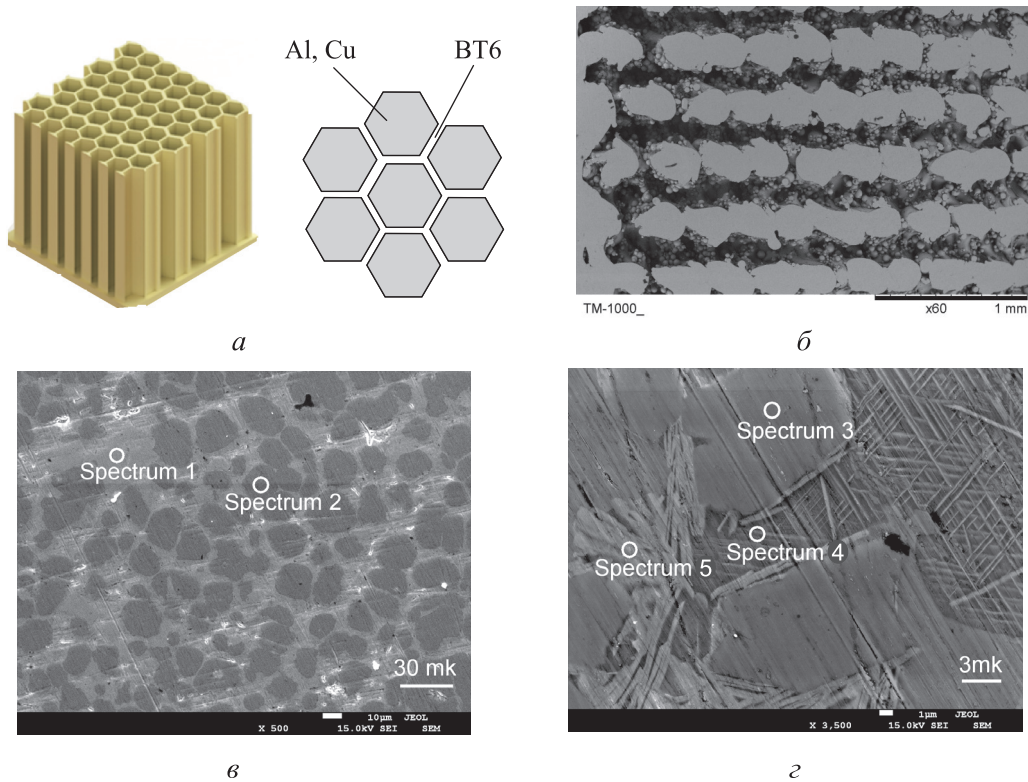


Рис. 6. Результаты исследования КМ ВТ6 — алюминиевая бронза:
a — схема инфильтрации; *б* — поверхность КМ, пропитанного алюминиевым сплавом; *в* — микроструктура с выделенными областями химического анализа при увеличении $\times 500$; *z* — игольчатая структура по объему связующего с выделенными областями химического анализа при увеличении $\times 3500$

го сплава ВТ6 с дальнейшей пропиткой расплавом более легкоплавкого металла.

Особенностью такого способа является то, что сначала методом SLM выращивают так называемую грин-модель (рис. 6, *a*), а затем проводят инфильтрацию — пропитку модели расплавом более легкоплавкого металла (рис. 6, *б*). Аналогичные структуры формируются при обычном спекании твердосплавных композитов, получаемых из бимодальных порошковых смесей WC-Co-Al(Al_2O_3) [28, 29, 36] и псевдосплавов на основе меди [23].

При отработке технологии 3D-печати титановых порошков предварительно моделировали и определяли функциональные взаимосвязи между режимами и температурными полями в области лазерного оплавления слоя. Это позволило оптимизировать режимы оплавления порошкового материала, что обеспечило равномерность распределения температуры в поверхностном слое проплавления порошка, снижение внутренней микропористости и отклонений размеров изделия.

Анализ результатов исследования микроструктуры образцов регулярной сотовой струк-

туры, пропитанных расплавом алюминия (КМ), методами растровой электронной микроскопии и определения относительной плотности (98 % теоретической) свидетельствует о достаточно высокой эффективности заполнения сотовых пустот и устранении остаточной пористости (см. рис. 6, *б*). Поверхность излома образцов после испытаний на изгиб имеет квазипластичный характер, что можно объяснить доминирующим влиянием свойств инфильтрованного материала (алюминиевого сплава).

В продолжение исследований по комплексному применению аддитивных технологий (SLM) и методов порошковой металлургии изучены возможности получения КМ из титанового сплава ВТ6, используемого как каркас-основа, и алюминиевой бронзы в качестве связующего. Исследование плотности, пористости, характера распределения фазовых составляющих, прочности, микротвердости и твердости по Бринеллю проводили на образцах по стандартным методикам.

Результаты исследований микроструктуры КМ ВТ6 — алюминиевая бронза приведены на рис. 6, *в* и *z* и в табл. 3. Применение метода фа-

Таблица 3

Химический состав областей, выделенных в микроструктуре КМ ВТ6 — алюминиевая бронза

| Область | Содержание химических элементов в КМ, ат. % | | | |
|------------|--|-------|-------|-------|
| | Al | Ti | V | Cu |
| Spectrum 1 | 12,79 | 50,90 | – | 36,31 |
| Spectrum 2 | 3,28 | 93,29 | 2,30 | 1,13 |
| Spectrum 3 | 12,09 | 51,41 | – | 36,50 |
| Spectrum 4 | 10,10 | 54,30 | 11,61 | 23,99 |
| Spectrum 5 | 2,27 | 46,73 | 1,74 | 49,26 |

Таблица 4

Прочностные свойства КМ ВТ6 — алюминиевая бронза

| Номер образца | Модуль упругости, МПа | Предел прочности, МПа | Твердость | |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----|
| | | | HRC | HB |
| 1 | 54 737,4 | 1143,6 | 35 | 340 |
| 2 | 50 447,9 | 1353,4 | 45 | 390 |
| 3 | 49 459,1 | 1567,7 | 45 | 410 |

зового контраста выявило наличие двух основных фаз: ВТ6 (см. рис. 6, в, spectrum 2) и алюминиевая бронза (рис. 6, в, spectrum 1).

Помимо повышения плотности и устранения остаточной пористости у сотовых структур из титанового сплава возрастает уровень прочностных свойств, так как алюминиевый сплав обеспечивает перераспределение напряжений, возникающих в титановом каркасе под нагрузкой. Измерение прочности на изгиб образцов из КМ ВТ6 — алюминиевая бронза, полученных по технологии инфильтрации, показали ее прирост до 25 % по сравнению с прочностью грин-модели.

Микроструктура и химический анализ фазовых составляющих свидетельствуют о достаточно высокой однородности структуры и эффективности пропитки — инфильтрации (см. рис. 6, з, spectrum 3–5), плотность и остаточная пористость (менее 1 %) подтверждают этот факт.

Весьма интересной особенностью, обнаруженной при изучении микроструктуры легкоплавкой фазы, является образование игольчатой структуры с выделением по объему вытянутых кристаллизованных зерен — вискерсов с поперечным сечением размером 0,1 мкм (см. рис. 6, з).

Появление такой армированной, фрагментарно-наноструктурированной фазы в КМ поз-

воляет предположить возможность дисперсного упрочнения алюминиевой бронзы и, как результат, композита в целом (табл. 4).

Результаты испытаний образцов на прочность и изгиб являются еще одним аргументом в пользу предложенного способа инфильтрации — пропитки, совместного использования аддитивных технологий и методов порошковой металлургии. Прочность на изгиб изменяется в диапазоне 1140...1560 МПа, модуль упругости — в интервале 49 500...54 000 МПа в зависимости от состава КМ и режимов SLM — мощности излучения и скорости перемещения луча.

Твердость КМ по Роквеллу изменяется в диапазоне 35...45 HRC, твердость по Бринеллю — в интервале 340...410 HB. Такие значения твердости КМ соответствуют высокопрочным чугунам и превышают твердость проката и прутков из сплава ВТ6, полученных традиционными методами металлургии и пластических деформаций с обработкой давлением (250...340 HB).

В какой-то степени аномально высокие значения твердости можно объяснить дисперсным упрочнением бронзовой фазы и композиционной структурой материала (образованного сочетанием двух взаимно проникающих структур — притированного методом SLM титано-

вого каркаса и связующего), которая в соответствии с механикой фаз и положениями теории прочности должна иметь более высокие прочностные показатели.

Выводы

1. Проведены комплексные численные и экспериментальные исследования, выявившие закономерности деформационных процессов и разрушения различных типов регулярных структур, созданных в соответствии с компьютерной моделью путем 3D-печати из пластика.

2. Определены наиболее предпочтительные по прочностным свойствам материалы и сотовые структуры.

3. Результаты предварительных исследований на пластиковых прототипах использованы при разработке составов и технологий изготовления металлических КМ на основе порошков титанового сплава ВТ6. Изучение прочностных свойств структур из ВТ6, полученных 3D-печатью в сочетании с инфильтрацией алюминиевыми сплавами и бронзой, подтвердили эффективность принятых конструкторско-технологических решений. По сравнению с параметрами базового сплава ВТ6 прочность на изгиб повысилась на 20...25 %, а твердость — в 1,5 раза.

4. Электронно-микроскопические исследования подтвердили однородность фазового распределения в структуре КМ и отсутствие остаточной пористости.

Литература

- [1] Chen L.Y., Liang S.X., Liu Y. et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, 2021, vol. 146, art. 100648, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
- [2] Najmon J.C., Raeisi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In: *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier, 2019, pp. 7–31.
- [3] Großmann A., Gosmann J., Mittelstedt C. Lightweight lattice structures in selective laser melting: design, fabrication and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, vol. 766, art. 138356, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138356>
- [4] Heinel P., Müller L., Körner C. et al. Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomater.*, 2008, vol. 4, no. 5, pp. 1536–1544, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.013>
- [5] Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М. и др. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба. *ЖТФ*, 2018, т. 88, № 7, с. 1014–1017, doi: <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.07.46169.2555>
- [6] Tino R., Leary M., Yeo A. et al. Gyroid structures for 3D-printed heterogeneous radiotherapy phantoms. *Phys. Med. Biol.*, 2019, vol. 64, no. 21, art. 21NT05, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/ab48ab>
- [7] Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. Вопросы применения высокопористых металлов и сотовых конструкций для защиты от ударноволновых нагрузок. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2012, № 7–8, с. 54–62.
- [8] Игонина Е.В., Дружинина О.В. Особенности разработки и применения FDM-технологии при создании и прототипировании 3D-объектов. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2017, т. 13, № 2, с. 185–193.
- [9] Henderson L., Glaser T., Kuester F. Towards bio-inspired structural design of a 3D printable, ballistically deployable, multi-rotor UAV. *IEEE Aerospace Conf.*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943970>
- [10] Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2013. 222 с.
- [11] Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N. et al. Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system. *Mater. Des.*, 2022, vol. 224, art. 111313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111313>
- [12] Do T., Kwon P., Shin C.S. Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017, vol. 121, pp. 50–60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.006>

- [13] Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. и др. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 79–88, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-79-88>
- [14] Lores A., Azurmendi N., Agote I. et al. A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. *Powder Metall.*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 267–296, doi: <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299>
- [15] Vangapally S., Agarwal K., Sheldon A. et al. Effect of lattice design and process parameters on dimensional and mechanical properties of binder jet additively manufactured stainless steel 316 for bone scaffolds. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 750–759, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.069>
- [16] Do T., Shin C.S., Stetsko D. et al. Improving structural integrity with boron-based additives for 3D printed 420 stainless steel. *Procedia Manuf.*, 2015, vol. 1, pp. 263–272, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.019>
- [17] Ziaee M., Tridas E.M., Crane N.B. Binder-jet printing of fine stainless steel powder with varied final density. *JOM*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 592–596, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2177-6>
- [18] Tang Y., Zhou Y., Hoff T. et al. Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process. *Mater. Sci. Technol.*, 2016, vol. 32, no. 7, pp. 648–656, doi: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000084>
- [19] Nandwana P., Elliott A.M., Siddel D. et al. Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges. *Curr. Opin. Solid State Mater.*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 207–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.002>
- [20] Mostafaei A., Stevens E.L., Hughes E.T. et al. Powder bed binder jet printed alloy 625: densification, microstructure and mechanical properties. *Mater. Des.*, 2016, vol. 108, pp. 126–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.067>
- [21] Turker M., Godlinski D., Petzoldt F. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Mater. Charact.*, 2008, vol. 59, no. 12, pp. 1728–1735, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.03.017>
- [22] Mostafaei A., Neelapu S.H.V.R., Kisailus C. et al. Characterizing surface finish and fatigue behavior in binder-jet 3D-printed nickel-based superalloy 625. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 200–209, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.012>
- [23] Gordeev Y.I., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V. et al. Investigation into the peculiarities of structure formation and properties of copper-based powder pseudoalloys modified by ZnO and TiN nanoparticle additives. *Russ. J. Non-ferrous Metals*, 2019, no. 60, no. 1, pp. 68–75, doi: <https://doi.org/10.3103/S1067821219010048>
- [24] Bai Y., Wagner G., Williams C.B. Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2017, vol. 139, no. 8, art. 081019, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4036640>
- [25] Sheydaeian E., Sarikhani K., Chen P. et al. Material process development for the fabrication of heterogeneous titanium structures with selective pore morphology by a hybrid additive manufacturing process. *Mater. Des.*, 2017, vol. 135, pp. 142–150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.025>
- [26] Xiong Y., Qian C., Sun J. Fabrication of porous titanium implants by three-dimensional printing and sintering at different temperatures. *Dent. Mater. J.*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 815–820, doi: <https://doi.org/10.4012/dmj.2012-065>
- [27] Enneti R.K., Prough K.C., Wolfe T.A. et al. Sintering of WC-12% Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2018, vol. 71, pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.023>
- [28] Gordeev Y.I., Yasinskiy V.B., Anistratenko N.E. et al. Study of the formation features of hard metal composites structure obtained from bimodal powder mixtures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 511, art. 012032, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/511/1/012032>
- [29] Gordeev Y.I., Zeer G.M., Yasinsky V.B. et al. Investigation of nanostructured hard metal composites obtained from powder mixtures (WC-Co)-Al₂O₃. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2373, no. 3, art. 032025, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/3/032025>

- [30] Lima P., Zocca A., Acchar W. et al. 3D printing of porcelain by layerwise slurry deposition. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 3395–3400, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.014>
- [31] Somasundram I.M., Cendrowicz A., Wilson D.I. et al. Phenomenological study and modeling of wick debinding. *Chem. Eng. Sci.*, 2008, vol. 63, no 14, pp. 3802–3809, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.040>
- [32] Kumar A., Bai Y., Eklund A. et al. Effects of hot isostatic pressing on copper parts fabricated via binder jetting. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 935–944, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.084>
- [33] Kumar A., Bai Y., Eklund A. et al. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 115–124, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.021>
- [34] Kernan B.D., Sachs E.M., Allen S.M. et al. Homogeneous steel infiltration. *Metall. Mater. Trans. A*, 2005, vol. 36, no. 10, pp. 2815–2827, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0278-x>
- [35] Балабанов С.В., Макогон А.И., Сычев М.М. и др. 3D-печать и механические свойства полиамидных изделий с топологией «примитив Шварца». *ЖТФ*, 2020, т. 90, № 2, с. 223–227, doi: <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.02.48813.209-19>
- [36] Gordeev Y.I., Yasinski V.B., Binchurov A.S. et al. Combined application of composite powders wc-co and additives of nanoparticles as an effective method of improving the properties of hard metals. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 769, pp. 134–140, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.769.134>

References

- [1] Chen L.Y., Liang S.X., Liu Y. et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, 2021, vol. 146, art. 100648, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
- [2] Najmon J.C., Raeisi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In: *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier, 2019, pp. 7–31.
- [3] Großmann A., Gosmann J., Mittelstedt C. Lightweight lattice structures in selective laser melting: design, fabrication and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, vol. 766, art. 138356, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138356>
- [4] Heinel P., Müller L., Körner C. et al. Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomater.*, 2008, vol. 4, no. 5, pp. 1536–1544, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.013>
- [5] Dyachenko S.V., Lebedev L.A., Sychev M.M. et al. Physicomechanical properties of a model material in the form of a cube with the topology of triply periodic minimal surfaces of the gyroid type. *ZhTF*, 2018, vol. 88, no. 7, pp. 1014–1017, doi: <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.07.46169.2555> (in Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 984–987, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784218070101>)
- [6] Tino R., Leary M., Yeo A. et al. Gyroid structures for 3D-printed heterogeneous radiotherapy phantoms. *Phys. Med. Biol.*, 2019, vol. 64, no. 21, art. 21NT05, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/ab48ab>
- [7] Markov V.A., Pusev V.I., Selivanov V.V. Highly porous metals and honeycomb structures for shock wave protection. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu*, 2012, no. 7–8, pp. 54–62. (In Russ.).
- [8] Igonina E.V., Druzhinina O.V. Particular qualities of the development and application of fdm-technology for creating and prototyping 3d-objects. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT-Education], 2017, vol. 13, no. 2, pp. 185–193. (In Russ.).
- [9] Henderson L., Glaser T., Kuester F. Towards bio-inspired structural design of a 3D printable, ballistically deployable, multi-rotor UAV. *IEEE Aerospace Conf.*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943970>

- [10] Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in machine building]. Sankt-Petersburg, SPbPU Publ., 2013. 222 p. (In Russ.).
- [11] Makarenko K.I., Konev S.D., Dubinin O.N. et al. Mechanical characteristics of laser-deposited sandwich structures and quasi-homogeneous alloys of Fe-Cu system. *Mater. Des.*, 2022, vol. 224, art. 111313, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111313>
- [12] Do T., Kwon P., Shin C.S. Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2017, vol. 121, pp. 50–60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.006>
- [13] Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. et al. Features of the process of selective laser melting from structural steel 28Cr3SiNiMoWV. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 10, pp. 79–88, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-10-79-88> (in Russ.).
- [14] Lores A., Azurmendi N., Agote I. et al. A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. *Powder Metall.*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 267–296, doi: <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299>
- [15] Vangapally S., Agarwal K., Sheldon A. et al. Effect of lattice design and process parameters on dimensional and mechanical properties of binder jet additively manufactured stainless steel 316 for bone scaffolds. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 750–759, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.069>
- [16] Do T., Shin C.S., Stetsko D. et al. Improving structural integrity with boron-based additives for 3D printed 420 stainless steel. *Procedia Manuf.*, 2015, vol. 1, pp. 263–272, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.019>
- [17] Ziaee M., Tridas E.M., Crane N.B. Binder-jet printing of fine stainless steel powder with varied final density. *JOM*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 592–596, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2177-6>
- [18] Tang Y., Zhou Y., Hoff T. et al. Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process. *Mater. Sci. Technol.*, 2016, vol. 32, no. 7, pp. 648–656, doi: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000084>
- [19] Nandwana P., Elliott A.M., Siddel D. et al. Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges. *Curr. Opin. Solid State Mater.*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 207–218, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.12.002>
- [20] Mostafaei A., Stevens E.L., Hughes E.T. et al. Powder bed binder jet printed alloy 625: densification, microstructure and mechanical properties. *Mater. Des.*, 2016, vol. 108, pp. 126–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.067>
- [21] Turker M., Godlinski D., Petzoldt F. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Mater. Charact.*, 2008, vol. 59, no. 12, pp. 1728–1735, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.03.017>
- [22] Mostafaei A., Neelapu S.H.V.R., Kisailus C. et al. Characterizing surface finish and fatigue behavior in binder-jet 3D-printed nickel-based superalloy 625. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 200–209, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.012>
- [23] Gordeev Y.I., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V. et al. Investigation into the peculiarities of structure formation and properties of copper-based powder pseudoalloys modified by ZnO and TiN nanoparticle additives. *Russ. J. Non-ferrous Metals*, 2019, no. 60, no. 1, pp. 68–75, doi: <https://doi.org/10.3103/S1067821219010048>
- [24] Bai Y., Wagner G., Williams C.B. Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2017, vol. 139, no. 8, art. 081019, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4036640>
- [25] Sheydaeian E., Sarikhani K., Chen P. et al. Material process development for the fabrication of heterogeneous titanium structures with selective pore morphology by a hybrid additive manufacturing process. *Mater. Des.*, 2017, vol. 135, pp. 142–150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.025>
- [26] Xiong Y., Qian C., Sun J. Fabrication of porous titanium implants by three-dimensional printing and sintering at different temperatures. *Dent. Mater. J.*, 2012, vol. 31, no. 5, pp. 815–820, doi: <https://doi.org/10.4012/dmj.2012-065>

- [27] Enneti R.K., Prough K.C., Wolfe T.A. et al. Sintering of WC-12% Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2018, vol. 71, pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.023>
- [28] Gordeev Y.I., Yasinskiy V.B., Anistratenko N.E. et al. Study of the formation features of hard metal composites structure obtained from bimodal powder mixtures. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 511, art. 012032, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/511/1/012032>
- [29] Gordeev Y.I., Zeer G.M., Yasinsky V.B. et al. Investigation of nanostructured hard metal composites obtained from powder mixtures (WC-Co)-Al₂O₃. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2373, no. 3, art. 032025, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/3/032025>
- [30] Lima P., Zocca A., Acchar W. et al. 3D printing of porcelain by layerwise slurry deposition. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 3395–3400, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.014>
- [31] Somasundram I.M., Cendrowicz A., Wilson D.I. et al. Phenomenological study and modeling of wick debinding. *Chem. Eng. Sci.*, 2008, vol. 63, no 14, pp. 3802–3809, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.040>
- [32] Kumar A., Bai Y., Eklund A. et al. Effects of hot isostatic pressing on copper parts fabricated via binder jetting. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 935–944, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.084>
- [33] Kumar A., Bai Y., Eklund A. et al. The effects of Hot Isostatic Pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 115–124, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.021>
- [34] Kernan B.D., Sachs E.M., Allen S.M. et al. Homogeneous steel infiltration. *Metall. Mater. Trans. A*, 2005, vol. 36, no. 10, pp. 2815–2827, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0278-x>
- [35] Balabanov S.V., Makogon A.I., Sychev M.M. et al. D printing and mechanical properties of polyamide products with Schwartz primitive topology. *ZhTF*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 223–227, doi: <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.02.48813.209-19> (in Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, 20250, vol. 65, no. 2, pp. 211–215, doi: <https://doi.org/10.1134/S1063784220020036>)
- [36] Gordeev Y.I., Yasinski V.B., Binchurov A.S. et al. Combined application of composite powders WC-Co and additives of nanoparticles as an effective method of improving the properties of hard metals. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 769, pp. 134–140, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.769.134>

Статья поступила в редакцию 14.02.2023

Информация об авторах

ГОРДЕЕВ Юрий Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: y.gordeev.tms@mail.ru).

БИНЧУРОВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, 79, e-mail: mexanixs@mail.ru).

Information about the authors

GORDEEV Yury Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: y.gordeev.tms@mail.ru).

BINCHUROV Alexander Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: mexanixs@mail.ru).

МОСКВИЧЕВ Егор Владимирович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий (660049, Красноярск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 53, e-mail: jugr@ict.nsc.ru).

ЗЕЕР Галина Михайловна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии обработки материалов». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: g-zeer@mail.ru).

ЗЕЛЕНКОВА Елена Геннадьевна — кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: EZelenkova@sfu-kras.ru).

ЯСИНСКИЙ Виталий Брониславович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: VYasinskiy@sfu-kras.ru).

ФИЛИППОВ Сергей Владиленович — аспирант кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: pushkin_2014@mail.ru).

ГЕРАСИМОВ Евгений Витальевич — аспирант кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, Российская Федерация, пр. Свободный, д. 79, e-mail: gerasimov24rus@mail.ru).

MOSKVICHEV Egor Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Federal Research Center for Information and Computing Technologies (660049, Krasnoyarsk, Russian Federation, Mira Ave., Bldg. 53, e-mail: jugr@ict.nsc.ru).

ZEER Galina Mikhailovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Science and Materials Machining Technologies. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: g-zeer@mail.ru).

ZELENKOVA Elena Gennadievna — Candidate of Science (Eng.), Head of Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: EZelenkova@sfu-kras.ru).

YASINSKIY Vitaliy Bronislavovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: VYasinskiy@sfu-kras.ru).

FILIPPOV Sergey Vladilenovich — Postgraduate, Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: pushkin_2014@mail.ru).

GERASIMOV Evgeniy Vitalievich — Postgraduate, Department of Design and Technology Support of the Machine Building Production. Siberian Federal University FSAEI of HE (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodny pr., Bldg. 79, e-mail: gerasimov24rus@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гордеев Ю.И., Бинчуров А.С., Москвичев Е.В., Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Ясинский В.Б., Филиппов С.В., Герасимов Е.В. Исследование свойств регулярных структур, полученных аддитивными технологиями в сочетании с методами порошковой металлургии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 28–43, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-28-43

Please cite this article in English as:

Gordeev Y.I., Binchurov A.S., Moskvichev E.V., Zeer G.M., Zelenkova E.G., Yasinskiy V.B., Filippov S.V., Gerasimov E.V. Investigation of properties of the regular structures obtained by additive technologies in combination with the powder metallurgy methods. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 28–43, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-28-43