

Научная статья

УДК 621.762

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



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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ repnin_arseniy@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ТРЕХМЕРНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ СОСТАВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы была разработка технологии изготовления мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В методом селективного лазерного плавления с изменением химического состава в трех направлениях. Проводились исследования микроструктуры с помощью оптического микроскопа, для анализа химического состава использовали сканирующий электронный микроскоп, фазовый состав оценивался на рентгеновском дифрактометре. Также проводились механические испытания на универсальных испытательных машинах. Было получено, что микроструктура зоны сплава БрХЦрТ В представляет собой столбчатые зерна с эпитаксиальным ростом по направлению изготовления образца. Между двумя сплавами имеется переходная зона, в которой происходит смешение сплавов. Она имеет усредненный химический состав, в ней не образуется новых фаз и наблюдаются пики, соответствующие фазам для обоих сплавов. Существование переходной зоны продолжается вплоть до нанесения и сплавления шестого слоя сплава БрХЦрТ В на сплав ВЖ159 (примерно 300 мкм). Мультиматериальный образец в испытаниях на растяжение показал большие чем в два раза значения (430 МПа против 203 МПа), но не превзошел показатели для ВЖ159 (1202 МПа). Относительное удлинение при растяжении и сжатии мультиматериального образца было меньше, чем у ВЖ159, БрХЦрТ В и Inconel 718. Анализ мультиматериальных образцов с изменением химического состава в трех направлениях показал, что наличие зоны смешения сплавов в одном слое печати величиной 350–400 мкм будет достаточно для устранения дефектов. Материалы статьи были представлены на Международной научно-практической конференции «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ 2024», проходившей в Санкт-Петербурге 13–17 мая 2024 года.

Ключевые слова: Селективное лазерное плавление, мультиматериалы, механические свойства, ВЖ159/БрХЦрТ В.

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

Для цитирования:

Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А. Исследование мультиматериальных образцов с трехмерным изменением состава, полученных методом селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 37–52. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30403>



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

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

 repnin_arseniy@mail.ru

INVESTIGATION OF MULTI-MATERIAL SAMPLES WITH THREE-DIMENSIONAL COMPOSITION CHANGE OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Abstract. The aim of this work was to develop a technology for the manufacturing multi-material VZh159/CuCr1Zr samples using selective laser melting with a change in chemical composition in three directions. The microstructure was investigated using an optical microscope, a scanning electron microscope was used to analyze the chemical composition, and the phase composition was estimated using X-ray diffractometer. Mechanical tests were carried out on universal testing machines. It was found that the microstructure of the CuCr1Zr alloy zone was columnar grains with epitaxial growth along the direction of sample fabrication. There is a interfacial zone between the two alloys, in which the alloys are mixed. It has an average chemical composition, no new phases are formed in it, and peaks corresponding to the phases for both alloys are observed. The interfacial zone continues to exist until the sixth layer of CuCr1Zr alloy is deposited and melted onto VZh159 alloy (approximately 300 μm). The multi-material samples showed mechanical properties more than 2 times higher values in tensile tests (430 MPa vs 203 MPa), but did not exceed the values for VZh159 (1202 MPa). The relative elongation in tension and compression of the multi-material sample was less than that of VZh159, CuCr1Zr and Inconel 718. The analysis of multi-material samples with a change in chemical composition in three directions showed that the presence of an alloy mixing zone in one printing layer of 350–400 μm will be sufficient to eliminate defects. The materials of the article were presented at the International Scientific and Practical Conference “Advanced Engineering Technologies (AET 2024)” held in St. Petersburg on May 13–17, 2024.

Keywords: selective laser melting, multi-materials, mechanical properties, VZh159/CuCr1Zr.

Acknowledgements: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-79-30004.

Citation:

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*, 30 (04) (2024) 37–52, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30403>

Введение. Внедрение новых производственных технологий, в частности аддитивного производства (АП), считается одной из составляющих новой промышленной революции [1]. В отличие от субтрактивного производства, такого как обычная механическая обработка, литье и ковка, АП создает трехмерную структуру путем непрерывного добавления материала слой за слоем (печати). Конструирование деталей производится при помощи систем автоматизированного моделирования и проектирования деталей [2]. В АП для изготовления изделий используются различные современные материалы (полимеры, металлы, керамика, композиты и т.д.). Данные материалы применяются в различных типах АП – струйное нанесение связующего (binder jetting, BJ), прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition, DED), экструзия материала (material extrusion, ME), листовая ламинация (sheet lamination, SL), струйное нанесение материала (material jetting MJ), фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization, VP) и синтез на подложке (powder bed fusion, PBF) [3].

Синтез на подложке в зависимости от используемого источника излучения разделяется на два основанных вида – селективное лазерное плавление (СЛП) и электронно-лучевое плавление (electron beam melting, ЕВМ). СЛП – это производственный метод получения (печати) заготовок и деталей путем послойного сплавления частиц металлического порошка по заданной электронной модели, которые располагаются на рабочей платформе внутри камеры установки (принтера) [4]. Чистота поверхности и механические свойства напечатанной детали сильно зависят от параметров процесса [4].

Мультиматериальное АП – это новый подход к производству, который набирает популярность в связи с развитием оборудования и расширением возможностей АП [5]. В данном подходе различные материалы с их свойствами объединяются в едином технологическом процессе для создания объектов, состоящих из нескольких материалов [6]. Разработка изделий с неоднородным составом материалов и высокой степенью адаптации к конструктивным, экологическим и дизайнерским критериям может быть использована для реализации различных потенциальных применений [7]. Поскольку АП обеспечивает неограниченную свободу проектирования и послойного нанесения материала, оно считается наиболее подходящим для решения задач, связанных с мультиматериалами [8, 9].

При печати мультиматериальных изделий из металлов методом СЛП возникают определенные ограничения, так как в большинстве оборудования используется одно устройство для подачи порошка [10]. Таким образом, новая конструкция устройства подачи порошка с несколькими источниками материалов может устранить это ограничение [9]. Например, исследователями из Национального университета Сингапура была осуществлена мультиматериальная печать с использованием стали 316L и медного сплава C52400 методом СЛП. В статье были представлены морфология, микроструктура, распределение элементов, фазовый состав и микротвердость многослойных поверхностей раздела между 316L и C52400. На обеих границах раздела видны изолированные островки из сплава различной формы и морфологии. Небольшие области сплавов 316L и C52400 размером 1–5 мкм образуются в ванне расплава в результате поверхностного натяжения, конвекции Марангони и быстрого охлаждения. Далее из-за перенасыщения материала и конвекции образуется множество более мелких частиц размером менее 1 мкм. Взаимная диффузия элементов и очень мелкие зерна размером менее 6 мкм обеспечивают отличные металлургические характеристики в переходной зоне [11]. Также было проведено исследование, посвященное изучению микроструктуры и механических свойств в переходной зоне мультиматериальных образцов из аустенитной нержавеющей стали 316L и никелевого сплава Inconel 718. В данной мультиматериальной системе часто возникают такие проблемы, как деформация, пористость и образование интерметаллидов. Для решения этих проблем после процесса изготовления мультиматериальных образцов методом СЛП применялось кручение под высоким давлением (высокочастотная термическая обработка). Целью этого процесса было создание ультрадисперсных и наноразмерных зерен в микроструктуре и уменьшение дефектов. Результаты показали снижение пористости, улучшение соединения двух сплавов и повышение плотности материала благодаря высокочастотной термической обработке [12].

Мультиматериальная печать может быть выполнена несколькими способами. Первый – более простой: один материал печатается поверх другого, то есть изменение химического состава происходит только в одном направлении [13]. Второй способ сложнее: материалы печатаются с изменением химического состава по трем направлениям – таких исследований в литературе не так много, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований. Можно отметить несколько исследований, где мультиматериальная печать была выполнена первым способом. В исследовании [14] группой ученых была использована концепция проектирования и изготовления изделия из нескольких материалов путем объединения различных медицинских сплавов в одну конструкцию многофункционального тазобедренного имплантата. Количество

операций по замене тазобедренного сустава значительно увеличивается из-за потери фиксации между имплантатом и костью, что приводит к поломке имплантата. В своей работе авторы пытались решить основные проблемы поломки: несоответствие жесткости тазобедренного имплантата из сплава Ti6Al4V и костной ткани, неравномерное контактное давление между имплантатом и костью и низкая износостойкость Ti6Al4V. Решение данных проблем стало возможно за счет использования мультиматериального строения тазобедренного имплантата из сплавов Ti6Al4V и NiTi.

Также стоит отметить исследование [15]. В этой работе была предпринята попытка разработать функциональные и конструкционные мультиматериалы из сплавов 316L и CuSn10 (нержавеющая сталь и оловянная бронза). В переходной зоне наблюдалось отсутствие дефектов (пор и трещин). Образцы показали высокие значения механических свойств – максимальное напряжение сдвига составило 210 МПа, что было выше, чем у сплавов сталь/медь, изготовленных другими способами.

Также стоит отметить исследование, связанное с мультиматериальной печатью вторым способом, то есть с изменением химического состава в трех направлениях [16]. В своем исследовании авторы использовали установку, в которой есть два устройства для подачи порошка и функция вакуумной очистки, что позволило печатать двумя разными порошками (Ti6Al4V и CoCrMo) на каждом слое. Применение нескольких материалов поможет использовать конструкцию вертлужной впадины тазобедренного сустава из новых материалов. Используя СЛП с изменением химического состава в трех направлениях, можно изготовить за одну печать вертлужную впадину, способную сочетать износостойкость сплава CoCrMo и экологичность сплава Ti6Al4V для костей.

Было проведено не так много работ по исследованию мультиматериалов системы жаропрочные никелевые сплавы/жаропрочная бронза, полученных методом СЛП. Стоит отметить исследование [17], в котором были получены мультиматериальные образцы из никелевого сплава Inconel 718 (In718) и меди (Cu). Такие изделия сочетают в себе высокую прочность In718 и высокую теплопроводность Cu в одной детали, что может быть применено в ракетных двигателях. В образцах In718/Cu было получено прочное соединение металла и сплава с узкой переходной зоной между двумя материалами. Кроме того, не было обнаружено крупных пор, трещин или других дефектов как на отдельных участках, так и в переходной зоне. Основной целью этого исследования было обоснование производства изделий из нескольких материалов методом СЛП. Также следует обратить внимание на работу [18], в которой группа ученых рассмотрела влияние параметров мультиматериальной печати образцов из никелевого сплава Inconel 718 (In718) и CuCrZr. Были изучены микроструктура, распределение элементов, микротвердость, свойства при растяжении и теплопроводность In718/CuCrZr.

Исходя из перспективности изготовления мультиматериалов из жаропрочных никелевых сплавов и жаропрочных бронз, изделия из которых могут найти широкое применение в авиакосмической отрасли, а также малого количества исследований в области СЛП с изменением химического состава в трех направлениях, была сформулирована цель данной работы: разработка технологии изготовления мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В с изменением химического состава в трех направлениях, исследование состава и микроструктуры переходной зоны, а также свойств изготавливаемых образцов.

Материалы и методы

Для изготовления исходного сырья – металлических порошков сплава ВЖ159 и БрХЦрТ В – применялся метод газовой атомизации. Производитель сплава ВЖ159 – ООО «Сфера М» (Россия, Свердловская область), производитель сплава БрХЦрТ В – ООО «НОРМИН» (Россия, г. Боровичи). Для обеспечения технологичности металлические порошки, которые используются при изготовлении изделий методом СЛП, должны иметь сферическую форму, что и было достигнуто

в выбранных материалах. Они должны обладать определенным гранулометрическим составом, например, 10–63 мкм или 10–45 мкм. Для выбранных материалов размер частиц находился в диапазоне 10–63 мкм. Кроме того, важными технологическими показателями являются текучесть и насыпная плотность порошка. Говоря о получении мультиматериалов методом СЛП, необходимо отметить, что данные параметры должны иметь схожие значения. В нашем случае они составили 23 и 25 с для текучести ВЖ159 и БрХЦрТ В, а также 3,35 и 3,65 г/см³ для насыпной плотности ВЖ159 и БрХЦрТ В.

Мультиматериальные образцы ВЖ159/БрХЦрТ В с изменением химического состава по направлению выращивания изготавливались на установке СЛП SLM 280HL (SLM Solutions, Германия), а мультиматериальные образцы с трехмерным изменением химического состава – на установке СЛП 3DLam Mini (3DLam, Россия). Заводская модель 3D-принтера была модифицирована для создания мультиматериальных образцов (рис. 1). Была изменена система подачи порошка – добавлены дополнительный бункер для второго материала и устройство его дозирования. Кроме того, мультиматериальный модуль имеет модифицированную систему распределения второго материала. Параметры изготовления представлены ниже.

Сплав ВЖ159:

- мощность лазера 275 Вт;
- скорость сканирования 760 мм/с;
- расстояние между проходами лазера 100 мкм;
- толщина слоя 50 мкм.

Сплав БрХЦрТ В:

- мощность лазера 400 Вт;
- скорость сканирования 300 мм/с;
- расстояние между проходами лазера 150 мкм;
- толщина слоя 50 мкм.

Для проведения исследований переходных зон мультиматериалов с использованием метода СЛП были получены образцы, которые в сечении имели размеры 10 × 10 мм с высотой 20 мм (рис. 2а). Размеры мультиматериальных образцов представлены в табл. 1 (рис. 2б).

Таблица 1

Размеры мультиматериальных образцов

Table 1

Dimensions of multi-material samples

Размер	Значение, мм		
	Мультиматериальные образцы для испытаний на растяжение	Мультиматериальные образцы для испытаний на сжатие	Образцы для испытаний на сжатие из сплава БрХЦрТ В
Ширина рабочей зоны	5	4,5	3
Длина рабочей зоны	20	7	8,3 (высота)
Толщина	2 (по 1 мм сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В по всей длине образца)	6 (по 3 мм сплавов ВЖ159/БрХЦрТ В по всей высоте образца)	3
Ширина захватов	8,2	–	–
Длина захватов	15	–	–

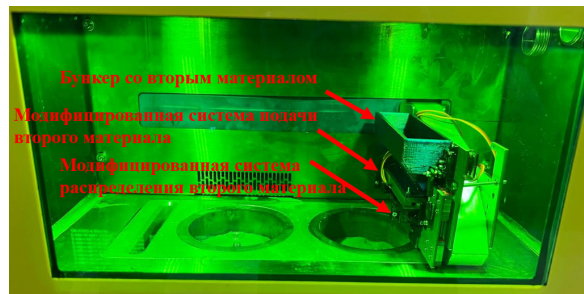


Рис. 1. Модуль для мультиматериальной печати методом СЛП на установке 3DLam Mini
 Fig. 1. Module for multi-material printing by SLM method on 3DLam Mini machine

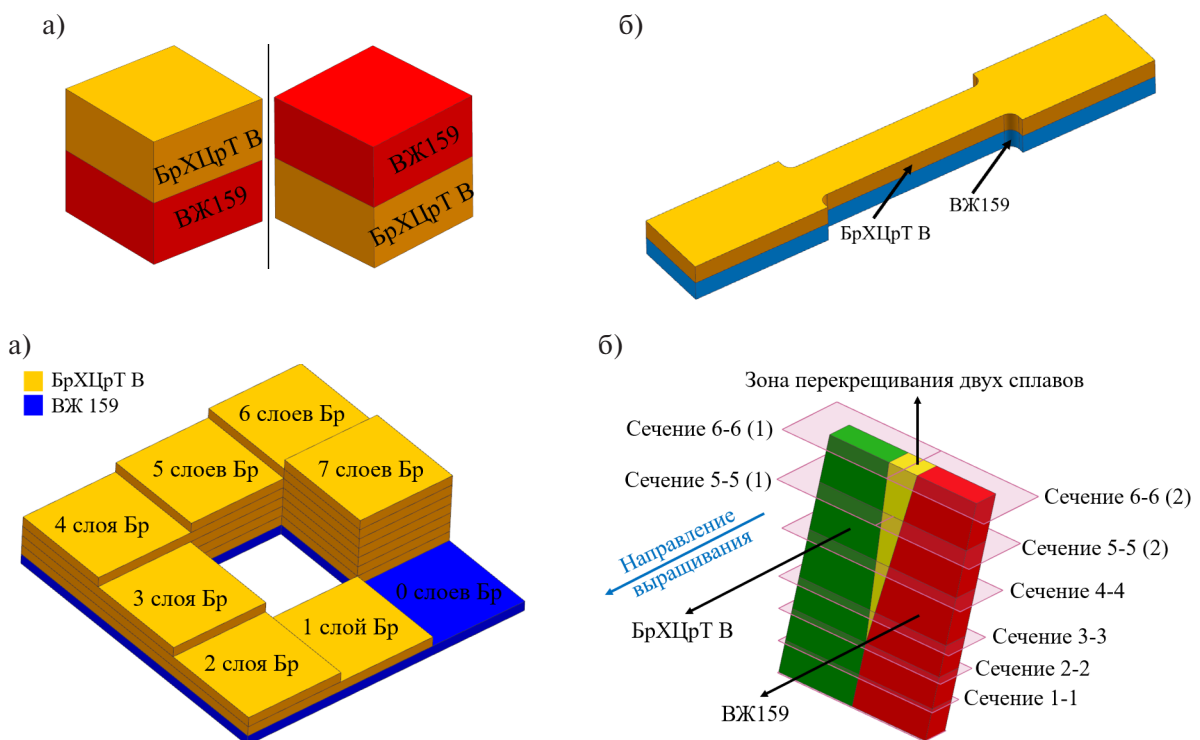


Рис. 2. Мультиматериальные образцы для проведения: а) исследований пористости микроструктуры, химического и фазового составов переходной зоны; б) испытаний на растяжение и сжатие; в) исследований толщины переходной зоны; г) исследований трехмерного мультиматериального строения

Fig. 2. Schematic representation of multi-material samples: а) for studies of microstructure, porosity, chemical and phase compositions of the interfacial zone; б) for tensile and compression tests; в) for studies of the interfacial zone thickness; г) for studies of three-dimensional multi-material structure

Для исследования толщины переходной зоны был изготовлен специальный мультиматериальный образец, который имел ступенчатый вид, определяемый количеством слоев сплава BrXCrTiV, выращенного на сплаве VЖ159 (рис. 2в). Для каждого участка образца строились дифрактограммы с помощью рентгеновского дифрактометра. Образец для исследования трехмерного мультиматериального строения представлен на рис. 2г.

Печь с возможностью проведения термической обработки (ТО) в вакууме Carbolite Gero (Carbolite Gero GmbH & Co. KG, Германия) использовалась для проведения обработки в вакууме (10^{-3} – 10^{-4} мбар) по режиму, представленному в табл. 2.

Таблица 2

Режимы термической обработки мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В

Table 2

Heat treatment parameters for VZh159/CuCr1Zr multi-material samples

Этап ТО	Значение
Нагрев	800°C
Выдержка	8 ч
Охлаждение	В печи до 700°C
Выдержка	10 ч
Охлаждение	На воздухе

Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа Leica DMi8 M (Leica Microsystems, Германия). Для исследования химического состава использовали сканирующий электронный микроскоп Mira 3 (TESCAN, Чехия) с модулем энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Фазовый состав анализировался на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab (Rigaku Corporation, Япония). Для проведения механических испытаний использовались универсальные одноосные испытательные машины напольного исполнения Zwick/Roell (Zwick Roell Group, Германия). Испытания на растяжение проводились на установке Zwick/Roell – Z050 при скорости растяжения 0,3 мм/мин.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показана микроструктура ВЖ159/БрХЦрТ В и переходной зоны между ними. Микроструктура зоны сплава БрХЦрТ В представляет собой столбчатые зерна с эпитаксиальным ростом по направлению изготовления образца, в ней отсутствуют линии границ ванн расплава. В классическом процессе подготовки шлифов к исследованию микроструктуры используются травители с определенным составом для каждого сплава. Однако для мультиматериальных образцов осуществить правильное травление достаточно сложно, так как в одном шлифе находятся два разных сплава. Кроме того, в переходной зоне имеется незаданный химический состав, который может непредсказуемо прореагировать на тот или иной травитель. В связи с этим в рассматриваемом образце в зоне сплава ВЖ159 не удалось протравить микроструктуру, а переходная зона представляет собой перетравленный участок, где не различима микроструктура. Стоит отметить отсутствие видимых дефектов – пор, трещин и т. д. – как в отдельных материалах, так и в переходной зоне.

Анализируя распределение элементов в переходной зоне мультиматериального образца из сплавов ВЖ159/БрХЦрТ В стоит отметить наличие области со стороны БрХЦрТ В, в которой помимо Cu присутствует Ni (рис. 4а). Такая же ситуация наблюдается со стороны ВЖ159, где существует область, в которой имеется как Ni, так и Cu (рис. 4б). Данные области можно назвать переходными, они и были видны при анализе микроструктуры. Можно предположить, что в данных областях будут формироваться усредненные химический состав и свойства. Стоит отметить, что наличие переходной зоны, с одной стороны, можно отнести к положительному явлению, так как отсутствие резкой границы раздела снижает количество возможных концентраторов напряжений. С другой стороны, в переходной зоне могут возникать дефекты, а также новые фазы, которые могут быть нежелательны, так как они способны оказывать влияние на механические свойства. С целью снижения размеров переходной зоны можно предложить использование оптимизированных режимов изготовления, когда, с одной стороны, они будут обеспечивать бездефектную печать, а с другой, снижать степень перемешивания сплавов.

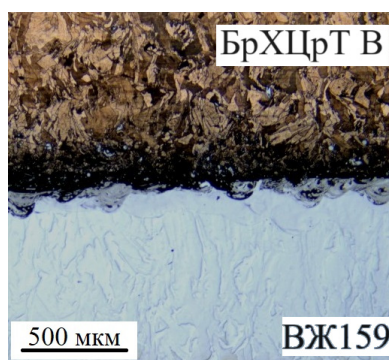


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны мультиматериального образца из сплавов ВЖ159/БрХЦрТ В
 Fig. 3. Microstructure in the interfacial zone of multi-material VZh159/CuCr1Zr sample

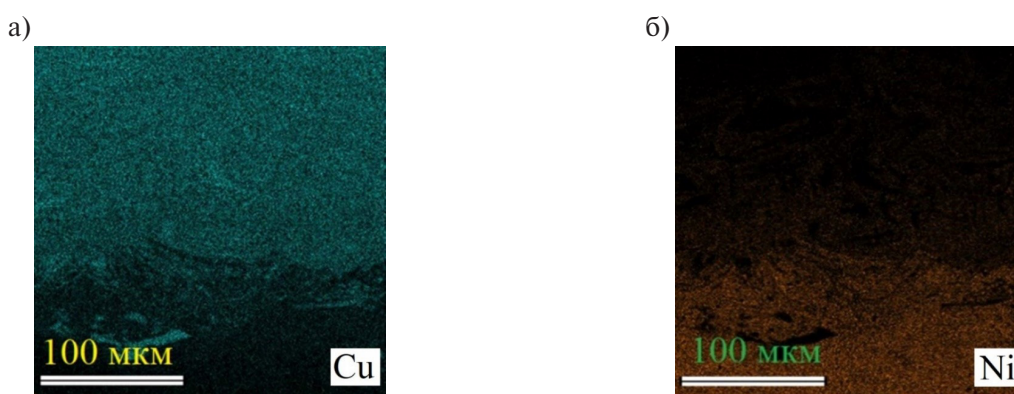


Рис. 4. Элементное картирование в переходной зоне мультиматериального образца ВЖ159/БрХЦрТ В
 Fig. 4. Compositional elemental mapping in the interfacial zone of multi-material VZh159/CuCr1Zr sample

Микротвердость ВЖ159/БрХЦрТ В и переходной зоны между ними представлена на рис. 5. Видно, что происходит постепенное изменение микротвердости от ВЖ159 (420 НВ) к БрХЦрТ В (70–80 НВ). Протяженность изменения микротвердости составляет примерно 0,3 мм. Величина значений микротвердости для зоны сплава ВЖ159 сопоставима с твердостью сплава аналога Inconel 718 (430 НВ) [19]. Твердость зоны сплава БрХЦрТ В ниже стандартных значений (100–110 НВ [20]), так как мультиматериальный образец подвергался термической обработке по режиму, характерному для ВЖ159, а не для БрХЦрТ В. Это было сделано по причине того, что в предполагаемых будущих изделиях конструкционную прочность будет обеспечивать сплав ВЖ159 и повышение его свойств является первостепенной задачей.

Вышеприведенные исследования, связанные с анализом микроструктуры, оценкой химического состава, определением твердости переходной зоны мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В могут дать ориентировочное понимание ее размеров – примерно 250–300 мкм. Для подтверждения выводов о размере переходной зоны были проведены дополнительные исследования, которые представляли рентгеноструктурный анализ образца, имевшего ступенчатый вид (рис. 2в). Для каждого участка образца строилась фазовая дифрактограмма (рис. 6).

Видно, что смешение сплавов, то есть существование переходной зоны, когда по рентгенограммам присутствуют оба сплава, продолжается вплоть до нанесения и сплавления шестого слоя сплава БрХЦрТ В. На седьмом слое не наблюдается пиков, соответствующих сплаву ВЖ159, то есть после данного слоя идет чистый сплав БрХЦрТ В. С учетом того, что величина одного слоя составляет 50 мкм, можно сказать, что ширина переходной зоны равна 300 мкм.

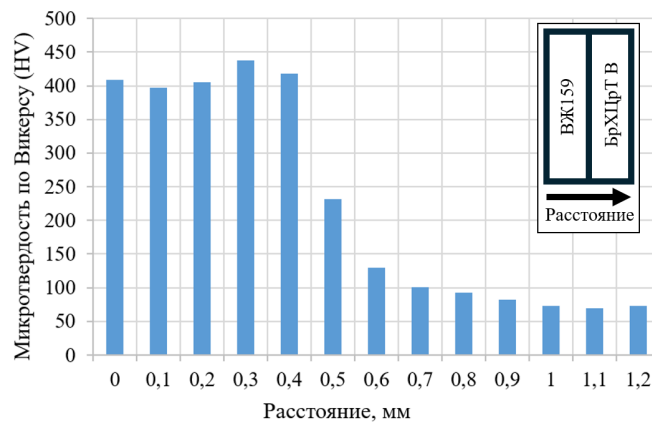


Рис. 5. Результаты анализа изменения твердости в переходной зоне мультиматериального образца ВЖ159/БрХЦрТ В

Fig. 5. Dependence of hardness change in the interfacial zone of multi-material VZh159/CuCr1Zr sample

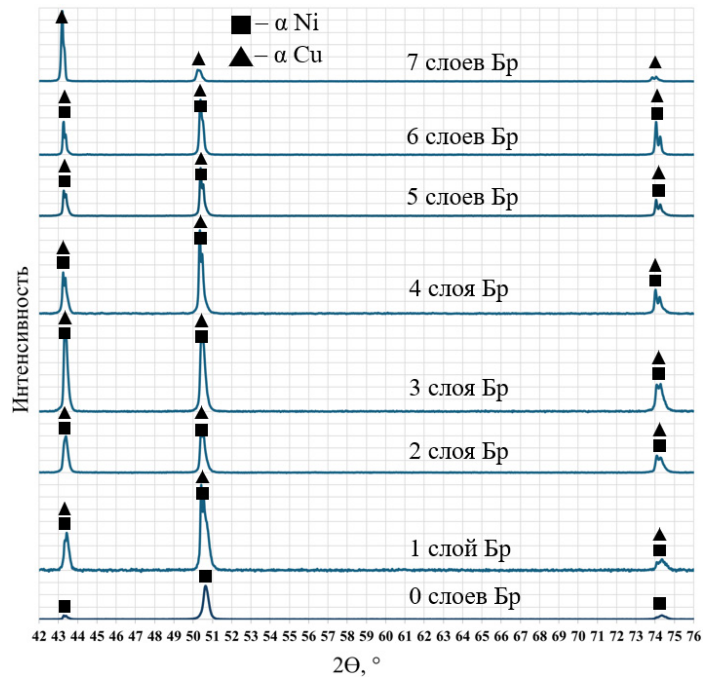


Рис. 6. Исследование ширины переходной зоны мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В с помощью метода рентгеновской дифракции

Fig. 6. Research of the interfacial zone width of multi-material samples VZh159/CuCr1Zr using the X-ray diffraction method

Анализируя фазообразование в системе Cu-Ni, можно отметить, что при взаимодействии двух элементов образуется непрерывный ряд твердых растворов (Cu, Ni). При этом система Cr-Cu характеризуется наличием двух твердых растворов на основе Cu и Cr. В системе Cu-Ni критическая температура существования зоны смешивания фаз составляет 354,5°C. При добавлении Cr фазовое разделение в γ -фазе становится термодинамически более благоприятным, в результате чего зона смешивания фаз расширяется, а критическая температура значительно повышается. Из рис. 7 видно, что в переходной зоне не образуется новых фаз и наблюдаются пики, соответствующие фазам для обоих сплавов.

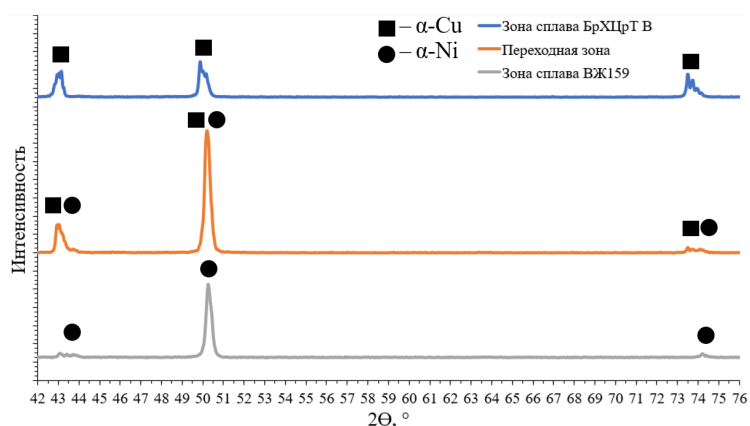


Рис. 7. Фазовый состав мультиматериального образца из сплавов ВЖ159/БрХЦрТ В
 Fig. 7. Results of phase composition analysis of the multi-material VZh159/CuCr1Zr sample

Мультиматериальный образец ВЖ159/БрХЦрТ В в испытаниях на растяжение показал увеличение предела прочности относительно БрХЦрТ В более чем в два раза (430 МПа против 203 МПа), но не превзошел значения для ВЖ159 (1202 МПа). Также в испытаниях на сжатие предел прочности системы ВЖ159/БрХЦрТ В оказался меньше, чем у Inconel 718. Относительное удлинение при растяжении и сжатии мультиматериального образца было меньше, чем у ВЖ159, БрХЦрТ В и Inconel 718. Это можно объяснить тем, что объем сплава, который в большей степени влияет на прочностные свойства (ВЖ159), был уменьшен вдвое. В связи с этим размеры дефектов и их количество в этом сплаве оказывали большее влияние на снижение свойств.

Таблица 3

**Результаты проведения механических испытаний
 мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В**

Table 3

Results of mechanical tests for multi-material VZh159/CuCr1Zr samples

Тип испытаний	Тип образцов	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Растяжение	Мульти	430	4,6
Сжатие		822	42,5
Растяжение	БрХЦрТ В [20]	203	13,5
Сжатие		—	—
Растяжение	ВЖ159 [21]	1202	26
Сжатие		—	—
Растяжение	Inconel 718 [22]	—	—
Сжатие		1900	47

Изготовление мультиматериалов методом СЛП с изменением химического состава в трех направлениях представляет особый интерес, так как является более сложной технологической задачей. Используемое оборудование для изготовления образцов, о которых говорилось выше, а именно SLM 280 HL, не обладает достаточными возможностями для изменения химического состава в горизонтальной плоскости. В связи с этим для исследования формирования переходной зоны мультиматериальных образцов системы ВЖ159/БрХЦрТ В с изменением химического

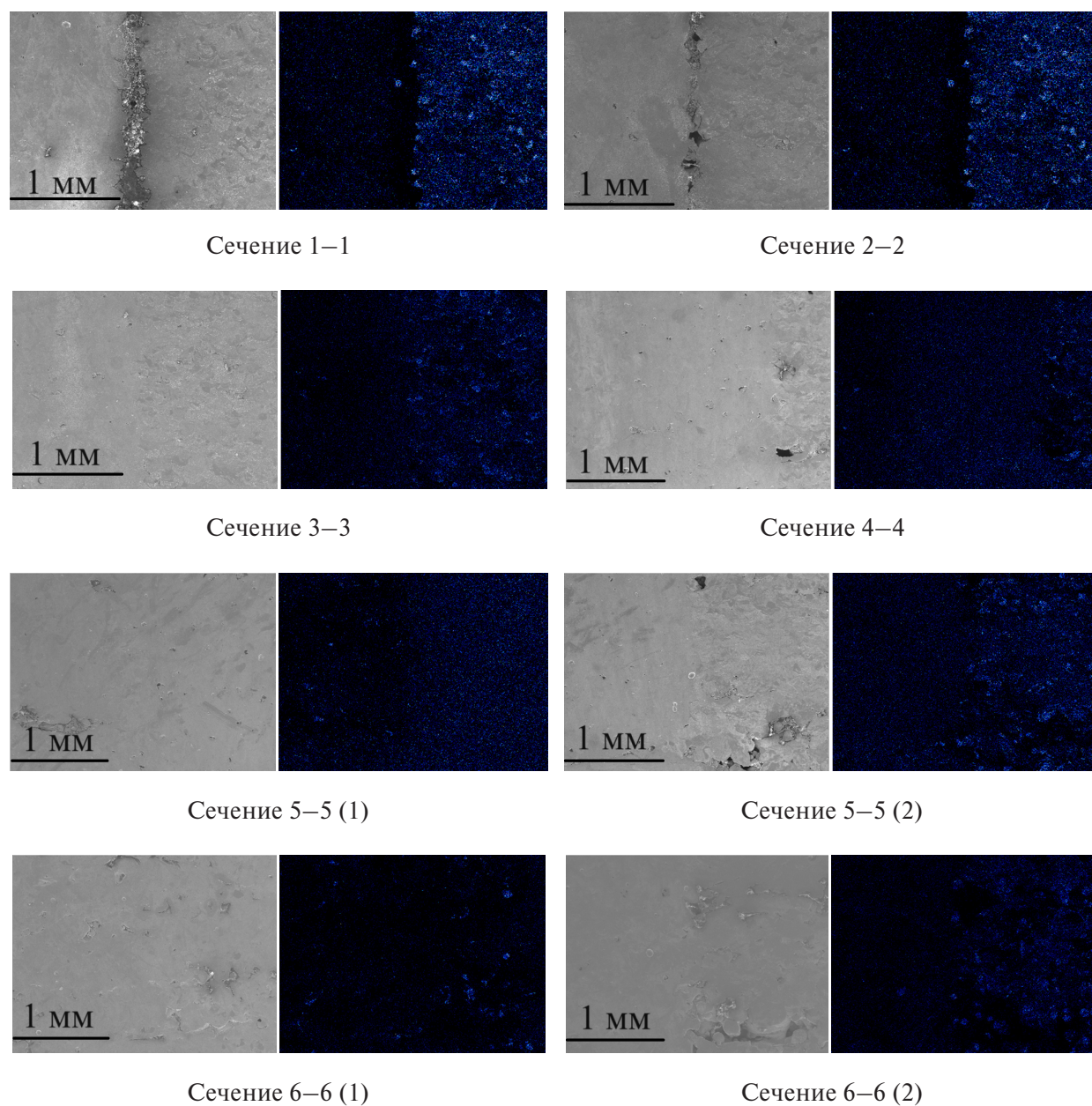


Рис. 8. Исследование мультиматериалов системы ВЖ159/БрХЦрТ В с изменением химического состава (изменение содержания Ni) в трех направлениях

Fig. 8. Research of the multi-material VZh159/CuCr1Zr system with a change in chemical composition (change in Ni) in three dimensions

состава в трех направлениях использовалась установка СЛП 3DLam Mini с модулем мультиматериальной печати.

Главной трудностью при изготовлении мультиматериалов с изменением химического состава в горизонтальной плоскости является неполное сплавление двух сплавов на границе раздела. В связи с этим эффективным способом является формирование области взаимного наложения двух сплавов. Стоит отметить, что ширина данной зоны должна быть правильно подобрана, чтобы, с одной стороны, отсутствовало неполное сплавление, а с другой, не было широкой зоны смешения сплавов, что может оказать негативный эффект на свойства мультиматериалов.

Оценку изменения химического состава в горизонтальной плоскости проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе (рис. 8). Видно, что при отсутствии перекрещивания сплавов в мультиматериале возникает образование непроплава (сечение 1–1 и сечение 2–2 на рис. 8).

При наличии зоны перекрещивания сплавов (примерный размер 350–400 мкм) данный дефект уходит (сечение 3–3). Также стоит отметить, что имеется достаточно выраженный переход от одного сплава к другому. При увеличении зоны перекрещивания переход становится менее выраженным, образуется более широкая переходная зона. Таким образом, можно предположить, что зоны перекрещивания в 350–400 мкм будет достаточно для устранения дефектов.

Выводы

В результате проведения исследований микроструктуры, химического и фазового составов, твердости и размеров переходной зоны, а также механических свойств и возможности формирования трехмерного изменения химического состава мультиматериальных образцов ВЖ159/БрХЦрТ В были получены следующие выводы.

1) Микроструктура зоны сплава БрХЦрТ В представляет собой столбчатые зерна с эпитаксиальным ростом по направлению изготовления образца. В мультиматериальном образце имеется область со стороны БрХЦрТ В, в которой помимо Cu присутствует Ni, а со стороны ВЖ159 имеется область, в которой имеется как Ni, так и Cu. Данная область распространяется по всей границе между двумя сплавами. Такую область можно назвать переходной зоной. В ней не образуется новых фаз и наблюдаются пики, соответствующие фазам для обоих сплавов.

2) Результаты рентгенофазового анализа показали, что существование переходной зоны продолжается вплоть до нанесения и сплавления шестого слоя сплава БрХЦрТ В на сплаве ВЖ159. С учетом того, что величина одного слоя составляет 50 мкм, можно сказать, что ширина переходной зоны равна примерно 300 мкм. Полученное значение также подтверждается рядом других исследований – анализом микроструктуры, химического состава и твердости.

3) Мультиматериальный образец в испытаниях на растяжение показал увеличение предела прочности относительно БрХЦрТ В более чем в два раза (430 МПа против 203 МПа), но не превзошел значения для ВЖ 159 (1202 МПа). Относительное удлинение при растяжении и сжатии мультиматериального образца было меньше, чем у ВЖ159, БрХЦрТ В и Inconel 718.

4) При отсутствии наложения сплавов в горизонтальной плоскости мультиматериала возникает образование непроплава. При наличии зоны наложения сплавов данный дефект уходит. Было выяснено, что зоны смешения в 350–400 мкм будет достаточно для устранения дефектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Pérez M., Carou D., Rubio E.M., Teti R.** Current advances in additive manufacturing // *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 88. P. 439–444. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.076
- [2] **Gardner L.** Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook // *Structures*. 2023. Vol. 47. P. 2178–2193. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.039
- [3] **Liu G., Zhang X., Chen X., He Y., Cheng L., Huo M., Yin J., Hao F., Chen S., Wang P., Yi S., Wan L., Mao Z., Chen Z., Wang X., Cao Z., Lu J.** Additive manufacturing of structural materials // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021. Vol. 145. P. 100596. DOI: 10.1016/j.mser.2020.100596
- [4] **Sefene E.M.** State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 250–274. DOI: 0.1016/j.jmsy.2022.04.002
- [5] **Han D., Lee H.** Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications // *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 158–166. DOI: 10.1016/j.coche.2020.03.004

- [6] **Bandyopadhyay A., Heer B.** Additive manufacturing of multi-material structures // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018. Vol. 129. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.mser.2018.04.001
- [7] **Pajonk A., Prieto A., Blum U., Knaack U.** Multi-material additive manufacturing in architecture and construction: A review // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. Art. no. 103603. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103603
- [8] **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. Vol. 6 (1). Art. no. 4. DOI: 10.3390/jmmp6010004
- [9] **Nazir A., Gokcekaya O., Md Masum Billah K., Ertugrul O., Jiang J., Sun J., Hussain S.** Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials // *Materials & Design*. 2023. Vol. 226. Art. no. 111661. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661
- [10] **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. Vol. 17. Iss. 2. P. 329–365. DOI: 10.1080/17452759.2022.2028343
- [11] **Bai Y., Zhang J., Zhao C., Li C., Wang H.** Dual interfacial characterization and property in multi-material selective laser melting of 316L stainless steel and C52400 copper alloy // *Materials Characterization*. 2020. Vol. 167. Art. no. 110489. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110489
- [12] **Sahu S., Harris J., Hamilton A.R., Gao N.** Interfacial characteristics of multi-material SS316L/IN718 fabricated by laser powder bed fusion and processed by high-pressure torsion // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 110. P. 52–69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.12.051
- [13] **Wei C., Li L.** Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion // *Virtual and Physical Prototyping*. 2021. Vol. 16. Iss. 3. P. 347–371. DOI: 10.1080/17452759.2021.1928520
- [14] **Bartolomeu F., Costa M.M., Alves N., Miranda G., Silva F.S.** Additive manufacturing of NiTi-Ti6Al4V multi-material cellular structures targeting orthopedic implants // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 134. Art. no. 106208. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106208
- [15] **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. Vol. 283. Art. no. 116701. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116701
- [16] **Bartolomeu F., Carvalho O., Gasik M., Silva F.S.** Multi-functional Ti6Al4V-CoCrMo implants fabricated by multi-material laser powder bed fusion technology: A disruptive material's design and manufacturing philosophy // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2023. Vol. 138. Art. no. 105583. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105583
- [17] **Marques A., Cunha Â., Gasik M., Carvalho O., Silva F.S., Bartolomeu F.** Inconel 718–copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: a novel technological and designing approach for rocket engine // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 122. P. 2113–2123. DOI: 10.1007/s00170-022-10011-x
- [18] **Zhang L., Dong P., Zeng Y., Yao H., Chen J.** Additive manufacturing of Inconel 718/CuCrZr multi-metallic materials fabricated by laser powder bed fusion // *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 92. Art. no. 104377. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104377
- [19] **Zhang D., Niu W., Cao X., Liu Z.** Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 644. P. 32–40. DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.021
- [20] **Артемов А.Л., Дядченко В.Ю., Лукьяшко А.В., Новиков А.Н., Попович А.А. и др.** Отработка конструктивных и технологических решений для изготовления опытных образцов внутренней оболочки камеры сгорания многофункционального жидкостного ракетного двигателя с использованием аддитивных технологий // *Космическая техника и технологии*. 2017. Т. 1, № 16. С. 50–62.

[21] **Прагер С.М., Солодова Т.В., Татаренко О.Ю.** Исследование механических свойств и структуры образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из сплава ВЖ159 // Труды ВИАМ. 2017. Т. 11, № 59. С. 3–11. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-1-1

[22] **Smith D.H., Bicknell J., Jorgensen L., Patterson B.M., Cordes N.L., Tsukrov I., Knezevic M.** Microstructure and mechanical behavior of direct metal laser sintered Inconel alloy 718 // Materials Characterization. 2016. Vol. 113. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.01.003

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РЕПНИН Арсений Вячеславович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3157-3317>

БОРИСОВ Евгений Владиславович – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-6706>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

REFERENCES

[1] **M. Pérez, D. Carou, E.M. Rubio, R. Teti,** Current advances in additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 88 (2020) 439–444. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.076

[2] **L. Gardner,** Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook, *Structures*, 47 (2023) 2178–2193. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.039

[3] **G. Liu, X. Zhang, X. Chen, Y. He, L. Cheng, M. Huo, J. Yin, F. Hao, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu,** Additive manufacturing of structural materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145 (2021) 100596. DOI: 10.1016/j.mser.2020.100596

[4] **E.M. Sefene,** State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review, *Journal of Manufacturing Systems*, 63 (2022) 250–274. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.04.002

[5] **D. Han, H. Lee,** Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28 (2020) 158–166. DOI: 10.1016/j.coche.2020.03.004

[6] **A. Bandyopadhyay, B. Heer,** Additive manufacturing of multi-material structures, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 129 (2018) 1–16. DOI: 10.1016/j.mser.2018.04.001

[7] **A. Pajonk, A. Prieto, U. Blum, U. Knaack,** Multi-material additive manufacturing in architecture and construction: A review, *Journal of Building Engineering*, 45 (2022) 103603. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103603

[8] **S. Hasanov, S. Alkunte, M. Rajeshirke, A. Gupta, O. Huseynov, I. Fidan, F. Alifui-Segbaya, A. Rennie,** Review on Additive Manufacturing of Multi-Material Parts: Progress and Challenges, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6 (1) (2021) 4. DOI: 10.3390/jmmp6010004

[9] **A. Nazir, O. Gokcekaya, K. Md Masum Billah, O. Ertugrul, J. Jiang, J. Sun, S. Hussain,** Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials, *Materials & Design*, 226 (2023) 111661. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111661

- [10] **D. Wang, L. Liu, G. Deng, C. Deng, Y. Bai, Y. Yang, W. Wu, J. Chen, Y. Liu, Y. Wang, X. Lin, C. Han**, Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion, *Virtual and Physical Prototyping*, 17(2) (2022) 329–365. DOI: 10.1080/17452759.2022.2028343
- [11] **Y. Bai, J. Zhang, C. Zhao, C. Li, H. Wang**, Dual interfacial characterization and property in multi-material selective laser melting of 316L stainless steel and C52400 copper alloy, *Materials Characterization*, 167 (2020) 110489. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110489
- [12] **S. Sahu, J. Harris, A.R. Hamilton, N. Gao**, Interfacial characteristics of multi-material SS316L/IN718 fabricated by laser powder bed fusion and processed by high-pressure torsion, *Journal of Manufacturing Processes*, 110 (2024) 52–69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.12.051
- [13] **C. Wei, L. Li**, Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion, *Virtual and Physical Prototyping*, 16(3) (2021) 347–371. DOI: 10.1080/174-52759.2021.1928520
- [14] **F. Bartolomeu, M.M. Costa, N. Alves, G. Miranda, F.S. Silva**, Additive manufacturing of NiTi-Ti6Al4V multi-material cellular structures targeting orthopedic implants, *Optics and Lasers in Engineering*, 134 (2020) 106208. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106208
- [15] **K. Chen, C. Wang, Q. Hong, S. Wen, Y. Zhou, C. Yan, Y. Shi**, Selective laser melting 316L/CuSn10 multi-materials: Processing optimization, interfacial characterization and mechanical property, *Journal of Materials Processing Technology*, 283 (2020) 116701. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116701
- [16] **F. Bartolomeu, O. Carvalho, M. Gasik, F.S. Silva**, Multi-functional Ti6Al4V-CoCrMo implants fabricated by multi-material laser powder bed fusion technology: A disruptive material's design and manufacturing philosophy, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 138 (2023) 105583. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105583
- [17] **A. Marques, Â. Cunha, M. Gasik, O. Carvalho, F.S. Silva, F. Bartolomeu**, Inconel 718–copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: a novel technological and designing approach for rocket engine, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (2022) 2113–2123. DOI: 10.1007/s00170-022-10011-x
- [18] **L. Zhang, P. Dong, Y. Zeng, H. Yao, J. Chen**, Additive manufacturing of Inconel 718/CuCrZr multi-metallic materials fabricated by laser powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, 92 (2024) 104377. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104377
- [19] **D. Zhang, W. Niu, X. Cao, Z. Liu**, Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy, *Materials Science and Engineering: A*, 644 (2015) 32–40. DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.021
- [20] **A.L. Artemov, V.Yu. Dyadchenko, A.V. Lukyashko, A.N. Novikov, A.A. Popovich et al.**, Development of design and technology solutions for additive manufacturing of prototype inner lining for combustion chamber of multifunctional liquid-propellant rocket engine, *Space Engineering and Technology*, 1(16) (2017) 50–62.
- [21] **S.M. Prager, T.V. Solodova, O.Yu. Tatarenko**, Research of mechanical properties and microstructure of samples obtained by SLS from metal powder composition of VZh159 alloy, *Proceedings of VIAM*, 11 (59) (2017) 3–11. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-1-1
- [22] **D.H. Smith, J. Bicknell, L. Jorgensen, B.M. Patterson, N.L. Cordes, I. Tsukrov, M. Knezevic**, Microstructure and mechanical behavior of direct metal laser sintered Inconel alloy 718, *Materials Characterization*, 113 (2016) 1–9. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.01.003

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Arseniy V. REPNIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3157-3317>

Evgenii V. BORISOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-6706>

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 10.09.2024; Одобрена: 29.09.2024; Принята: 03.10.2024.

Submitted: 10.09.2024; Approved: 29.09.2024; Accepted: 03.10.2024.