

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>



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

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

✉ repnin_arseniy@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ В МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СПЛАВОВ INCONEL 718 И Ti6Al4V МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является исследование мультиматериала Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb, изготовленного методом селективного лазерного плавления (СЛП). Для этого необходимо провести исследование формирования микроструктуры, химического и фазового состава, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов, определить влияние использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов. В областях сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 отсутствуют значительные дефекты, но они встречаются в областях Cu и Nb, а также в переходной зоне Cu/Nb. Переходные зоны Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu имеют достаточно резкий переход по изменению химического состава. Схожая картина наблюдается в переходной зоне Ti6Al4V/Cu, а в переходной зоне Nb/Cu присутствует постепенный переход от одного элемента к другому. Наблюдается эффект формирования островковой макро-сегрегации во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. В процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. Мультиматериальные образцы с переходным слоем Cu+Nb имеют значения механических свойств выше, чем мультиматериальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Предел прочности мультиматериального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, а с переходными слоями Cu+Nb – 910 МПа, что является достаточно высокими значениями, но ниже свойств сплавов Inconel 718 или Ti6Al4V.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, мультиматериалы, переходный слой, Inconel 718, Ti6Al4V.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии № 075-03-2024-004).

Для цитирования:

Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А. Формирование переходных слоев в мультиматериальных изделиях из сплавов Inconel 718 и Ti6Al4V методом селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 97–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>



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

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

 repnin_arseniy@mail.ru

FORMATION OF INTERLAYER IN MULTI-MATERIAL INCONEL 718 AND Ti6Al4V ALLOY PRODUCTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. This study examines the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material with Cu and Cu+Nb interlayer produced by selective laser melting (SLM). To achieve this, it is important to investigate the microstructure, the chemical and phase composition, and the hardness of the interfacial zone in the multi-material samples, as well as to determine the effect of the use of interlayer on the mechanical properties of multi-material samples. It was observed that no significant defects were present in the alloy regions (Ti6Al4V and Inconel 718) of multi-materials. However, defects were identified in the Cu and Nb regions, as well as in the Cu/Nb interfacial zone. The interfacial zones of the Ti6Al4V/Nb and Inconel 718/Cu exhibited a sharp transition in the chemical composition. A comparable pattern was observed in Ti6Al4V/Cu interfacial zone, while the Nb/Cu interfacial zone exhibited a gradual transition from one element to another. The formation of island macro-segregation was observed in all interfacial zones: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu and Inconel 718/Cu. No new phases were identified in the production of the multi-material samples. The multi-material samples with the Cu+Nb interlayer exhibited enhanced mechanical properties compared with samples with Cu interlayer. The tensile strength of the multi-material sample with Cu interlayer reached 790 MPa, while with the Cu+Nb interlayer reached 910 MPa. These values are relatively high, but nevertheless lie below Inconel 718 or Ti6Al4V alloy properties.

Keywords: selective laser melting, multi-materials, interlayer, Inconel 718, Ti6Al4V.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant Agreement No. 075-03-2024-004).

Citation:

Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Formation of transition layers in multi-material Inconel 718 and Ti6Al4V alloy products obtained by selective laser melting, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 97–113, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>

Введение. Изделия с мультиматериальным строением обладают преимуществами по сравнению с изделиями с однородным строением [1]. Текущий уровень развития производственных технологий дает возможность изготавливать подобного рода изделия со сложной геометрией [2]. В основном это реализуется за счет использования новых производственных технологий [3], поскольку существующие ограничения традиционных технологий не дают в полной мере раскрыть потенциал конструирования мультиматериальных изделий [4]. Применение аддитивных технологий предоставляет возможность изготовления сложнопрофильных мультиматериальных изделий с пространственным распределением материалов по детали [5, 6]. Например, такой вид, как селективное лазерное плавление (СЛП), позволяет успешно изготавливать мультиматериальные изделия из металлов и сплавов [7]. На данный момент активно проводятся исследования таких мультиматериальных систем, как стали / медные сплавы [8–11], нержавеющие стали / жаропрочные никелевые сплавы [12–14], жаропрочные никелевые сплавы / медные сплавы [15–18] и т.д. [19–21].

Особый интерес представляет создание деталей из комбинации несвариваемых между собой сплавов, например таких как титановые сплавы и жаропрочные никелевые сплавы [22–24]. Актуальность применения данного рода изделий обусловлена требованиями к изделиям в аэрокосмической отрасли, где присутствует необходимость создания одновременно жаропрочных и легких деталей [25–27]. Основная идея, реализуемая в данном подходе, – это снижение массы изделий за счет мультиматериального строения, где часть изделия, работающая при повышенных температурах, будет состоять из жаропрочного никелевого сплава, а часть изделия, работающая при умеренных температурах, – из титанового сплава с меньшей плотностью [28, 29]. Однако стоит отметить, что возникают проблемы при изготовлении подобного рода мультиматериальных изделий – это поры, трещины, непроплавы в переходной зоне и т.д. [21]. Поэтому существует необходимость разработки методики объединения таких материалов без дефектов. Например, в своей работе M.G. Scaramuccia et al. рассматривали мультиматериальную систему Inconel 718/Ti6Al4V, полученную методом СЛП [21]. Авторы отмечают, что в данном мультиматериале возникают трещины, причиной которых может быть наличие охрупчивающего интерметаллида Ti_2Ni , когда процентное содержание сплава Inconel 718 превышает 20 масс. %. Для снижения дефектов исследователи предлагают использовать градиентный переход от сплава Ti6Al4V к сплаву Inconel 718. Q. Li в своей докторской диссертации исследовал ряд мультиматериальных систем, полученных методом СЛП, в которых одним из сплавов был титановый $\alpha+\beta$ сплав – Ti6Al4V, а вторыми сплавами – Invar и Cu10Sn [30]. Исследователь отмечает, что наличие титана в сплаве Ti6Al4V и никеля в сплаве Invar обуславливает металлургическую несовместимость – несвариваемость, приводящую к образованию хрупких интерметаллических фаз, таких как $TiNi_3$ и Ti_2Ni . Кроме того, в переходной зоне мультиматериала Ti6Al4V/Invar присутствуют интерметаллические фазы FeNi и CuNi с различными механическими свойствами, которые являются причиной образования трещин. Также в переходной зоне была найдена другая интерметаллическая фаза, такая как TiFe, которая оказывают влияние на микроструктуру и механические свойства.

Видно, что в мультиматериалах, полученных методом аддитивного производства (АП), в которых одним из элементов является сплав на основе титана, в переходной зоне возникают трещины. Причиной подобного рода трещин может быть влияние фазовых особенностей формирования переходной зоны. Для снижения подобного рода влияния в традиционных технологиях и в методах АП при получении мультиматериалов используют переходные слои. Авторы отмечают, что наличие переходного слоя снижает количество охрупчивающих интерметаллидов и стабилизирует процесс формирования мультиматериала [31–34]. В. Onuik et al. в своей работе исследовали мультиматериальные образцы системы Inconel 718/Ti6Al4V, которые были получены методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ) [35]. Были рассмотрены три варианта получения мультиматериальных образцов: выращивание сплава Inconel 718 на Ti6Al4V, градиентное изменение состава от сплава Inconel 718 к Ti6Al4V и использование промежуточного связующего слоя между Inconel 718 и Ti6Al4V. Сплавы Ti6Al4V и Inconel 718 имеют различные термические свойства, также на границе раздела двух сплавов образуется хрупкая интерметаллическая фаза, что приводит к такому дефекту, как расслоение. Для устранения данного дефекта авторы использовали композиционный переходный слой, который представлял собой смесь карбида ванадия (VC) и сплавов Ti6Al4V и Inconel 718. Благодаря этому удалось получить бездефектный мультиматериал Inconel 718/Ti6Al4V. Композиционный переходный слой улучшил прочность соединения, предотвратив образование охрупчивающих интерметаллидов, таких как $TiNi_3$ и Ti_2Ni , а также уменьшил термические напряжения в переходной зоне. A. Thiriet et al. исследовали влияние переходного слоя из молибдена в мультиматериальном образце Ti6Al4V/Ti6Al4V-Mo/Mo-Inconel 718, полученном тем же методом ПЛВ, на снижение дефектов [36]. Было выяснено, что использование переходного слоя может стать решением проблемы

при выращивании разнородных несвариваемых в переходной зоне сплавов, но это может привести к формированию различных типов микроструктуры даже в пределах одного образца.

H.-I. Jeong et al. использовали технологию ПЛВ и рассматривали все ту же систему – Ti6Al4V/Inconel 718, – при этом выбрав переходный слой из высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Ti-Nb-Cr-V-Ni [37]. Было выявлено, что не происходит образование и диффузия интерметаллидов из сплава Inconel 718 в Ti-Nb-Cr-V-Ni из-за быстрой стабилизации фазы. Однако между Ti-Nb-Cr-V-Ni и Ti-6Al-4V происходили образование интерметаллида Ti-Ni и его диффузия в Ti-6Al-4V. Диффузия произошла потому, что большое количество Ti содержится в ВЭС, что привело к снижению стабильности фазы. В результате анализа микроструктуры было установлено, что в областях чистых сплавов не происходит образование интерметаллидов, но они образуются в переходных зонах. На границе раздела Inconel 718 и Ti-Nb-Cr-V-Ni образовалась зона фаз Лавеса, причиной которых могла быть диффузия Ni и Cr в Ti-Nb-Cr-V-Ni из Inconel 718.

Из литературного обзора видно, что при изготовлении мультиматериалов из несвариваемых в переходной зоне возникают различного рода дефекты. Решить эту проблему можно за счет формирования переходных слоев из металлов и сплавов. Подобного рода подход успешно реализуется в традиционных технологиях и в таком методе АП, как прямой подвод энергии и материала. Исследований, связанных с формированием переходного слоя в мультиматериалах Inconel 718/Ti6Al4V, полученных методом СЛП, не так много, что обуславливает проведение дополнительных исследований. В связи с этим целью данной работы является исследование мультиматериала Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb, изготовленного методом СЛП. Для этого необходимо провести исследования формирования микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов, определить влияние использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов.

Материалы и методы

Для получения мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V предлагается использовать переходной слой из Cu и Cu+Nb. Видно, что имеется сходство гранулометрического состава большинства порошков (табл. 1). Исключением является порошок Nb, который имеет более крупный гранулометрический состав. Различие в гранулометрическом составе может привести к определенным нарушениям формируемого при печати слоя.

Таблица 1

Гранулометрический состав используемых порошковых материалов

Table 1

Particle size distribution of the powder materials

Объем, %	Порошки			
	Ti6Al4V	Nb	CuCr1Zr	Inconel 718
	< мкм	< мкм	< мкм	< мкм
10	19	47	14	20
50	35	83	29	38
90	63	128	52	66

Мультиматериальные образцы Inconel 718/Ti6Al4V изготавливались на установке СЛП 3DLam Mini в атмосфере аргона на титановой платформе построения. Заводская модель 3D-принтера была модифицирована для создания мультиматериальных образцов. Была изменена

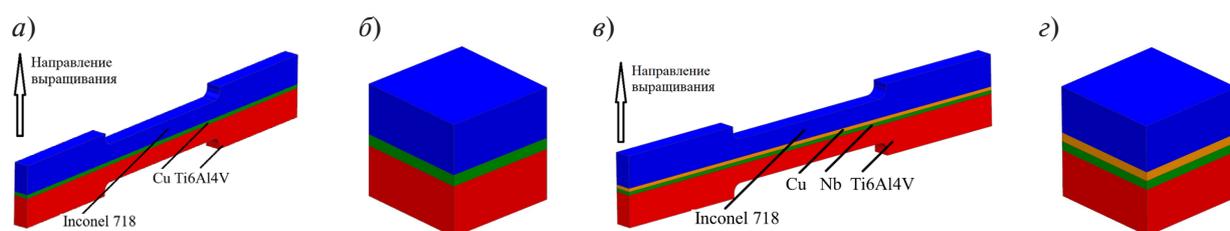


Рис. 1. Геометрия мультиматериальных образцов для проведения исследований:
a, в) образцы для испытаний на растяжение; *б, д*) образцы для металлографических исследований

Fig. 1. Geometry of the multi-material samples for the studies:
a, c) tensile test samples; *b, d*) samples for metallographic studies

система подачи порошка – добавлены дополнительный бункер для второго материала и устройство его дозирования. Кроме того, мультиматериальный модуль имеет модифицированную систему распределения второго материала. Режимы изготовления мультиматериалов для каждого сплава представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры процесса изготовления мультиматериальных образцов методом СЛП

Table 2

Process parameters of the multi-material samples production by SLM

Материалы	Параметры процесса			
	Мощность лазера	Скорость сканирования	Расстояние между проходами лазера	Толщина слоя
	Вт	мм/с	мм	мм
Ti6Al4V	275	805	0,12	0,05
Nb	275	200	0,1	0,05
CuCr1Zr	250	200	0,1	0,05
Inconel 718	275	760	0,1	0,05

Схематично образцы для проведения металлографических исследований и испытаний на растяжение представлены на рис. 1. Распределение переходных слоев было следующим: для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V – 500 мкм Cu, Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V – 500 мкм Cu + 500 мкм Nb (в соответствии с 3D-моделью). При этом толщина Inconel 718 и Ti6Al4V в рабочей зоне образцов на растяжение составила 2,35 мм для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V и 2,1 мм для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V. Изготовление мультиматериалов на модифицированной установке 3DLam Mini позволяет осуществлять замену материала в основном и мультиматериальном модулях во время процесса печати с небольшой задержкой без открытия рабочей камеры установки. Такая особенность позволяет изготавливать мультиматериальные образцы более чем из двух сплавов.

Микроструктуру мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V изучали с помощью оптического микроскопа Leica DMi8 M (Leica Microsystems, Германия). Для травления мультиматериальных образцов использовались следующие травители: 83% дистиллированной воды, 14% HNO₃, 3% HF и 100 мл дистиллированной воды, 11 мл насыщенного водного раствора сульфата натрия, 40 г метабисульфата калия. Для изучения химического состава и проведения фрактурграфических исследований мультиматериальных образцов использовали сканирующий электронный микроскоп Mira 3 (TESCAN, Чехия) с модулем энергодисперсионной рентгеновской

спектроскопии. Фазовый состав мультиматериальных образцов анализировался на дифрактометре Rigaku SmartLab (CuK α излучение, Rigaku Corporation, Япония). Для фазового анализа данное оборудование может использовать метод рентгеновской микродифракции с шириной пучка 100 мкм. Именно благодаря использованию микродифракции появляется возможность проводить исследования непосредственно в переходных слоях между двумя сплавами. Микротвердость мультиматериальных образцов измеряли на микротвердомере по Викерсу MicroMet 5101 (Buehler Ltd, США). Для проведения механических испытаний мультиматериальных образцов использовалась универсальная одноосная испытательная машина напольного исполнения Zwick/Roell (Zwick Roell Group, Германия).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты исследований дефектов в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb. Из рис. 2*a* видно, что области сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 имеют небольшое количество дефектов, которые допустимы при изготовлении изделий методом СЛП.

Однако область Cu обладает большим количеством дефектов (пор), что можно связать с низкой технологичностью данного материала из-за его физических свойств (высокая проводимость и высокая отражательная способность). В области Nb также имеется пористость, но менее выраженная. Ее причина может быть аналогична возникновению пористости в области Cu, а также причиной может быть использование более крупного порошка. При рассмотрении переходных зон Ti6Al4V/Cu (рис. 2*b*), Inconel 718/Cu (рис. 2*в*) и Ti6Al4V/Nb (рис. 2*г*) становится видно, что в них отсутствуют существенные дефекты, но имеются области взаимного перемешивания сплавов. Необходимо отметить наличие дефектов в переходной зоне Cu/Nb (рис. 2*д*). Объем дефектов незначительный, но он может оказать влияние на механические свойства. В данной переходной зоне также присутствует взаимное перемешивание сплавов. Далее данная особенность будет рассмотрена более подробно.

На рис. 3 представлены результаты исследования микроструктуры мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb. В результате травления образцов можно четко проследить эффект взаимного перемешивания элементов сплавов. Видно, что наблюдается эффект формирования островковой макросегрегации (областей перемешивания) во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. Развитие островковой макросегрегации объясняется эффектом Марангони [38]. Эффект Марангони возникает, когда повышенная температура в центральной области бассейна расплава вызывает снижение поверхностного натяжения, в результате чего расплавленный металл течет в обратном направлении. Постоянный приток энергии усиливает обратный поток, в результате чего он возвращается в центр бассейна расплава, образуя завихрения [39]. Из-за быстрого охлаждения и недостаточного времени для распределения химических элементов возникают неоднородности, приводящие к образованию островковой макросегрегации в вихревых потоках [34].

Образование островковой макросегрегации скорее можно отнести к отрицательному фактору, так как в подобного рода зонах возможно образование нежелательных фаз, например охрупчивающих интерметаллидов [40]. Предположительно снизить количество островковой макросегрегации возможно за счет подбора режимов печати с более низкой объемной плотностью энергии. Однако при этом необходимо учитывать, что слишком низкая плотность энергии может привести к образованию дефектов (непроплаву). Для более точного понимания того, как параметры процесса оказывают влияние на образование островковой макросегрегации в мультиматериалах, необходимо проведение дополнительных исследований.

На рис. 4 представлены результаты исследований химического состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb. Видно, что наблюдается достаточно

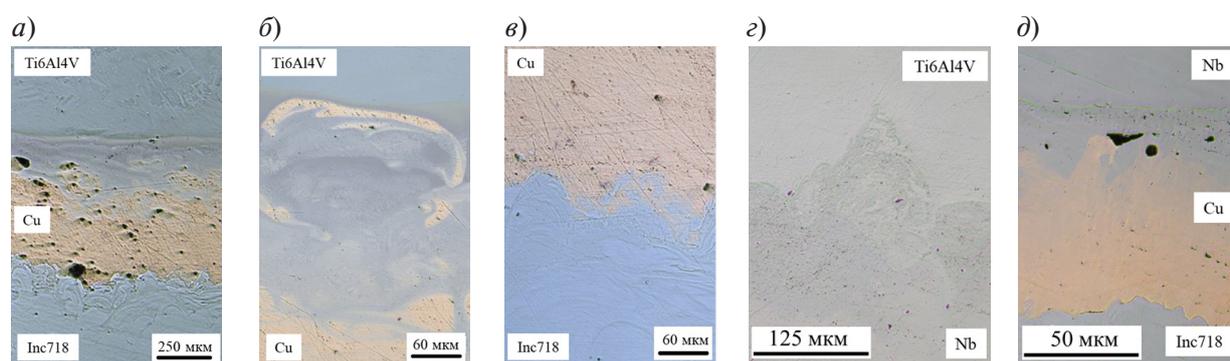


Рис. 2. Исследование дефектов в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) переходная зона Ti6Al4V/Cu/Inconel 718; б) переходная зона Ti6Al4V/Cu; в) переходная зона Inconel 718/Cu; г) переходная зона Ti6Al4V/Nb; д) переходная зона Nb/Cu/Inconel 718

Fig. 2. Defect analysis in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Ti6Al4V/Cu/Inconel 718 interfacial zone; б) Ti6Al4V/Cu interfacial zone; в) Inconel 718/Cu interfacial zone; г) Ti6Al4V/Nb interfacial zone; д) Nb/Cu/Inconel 718 interfacial zone

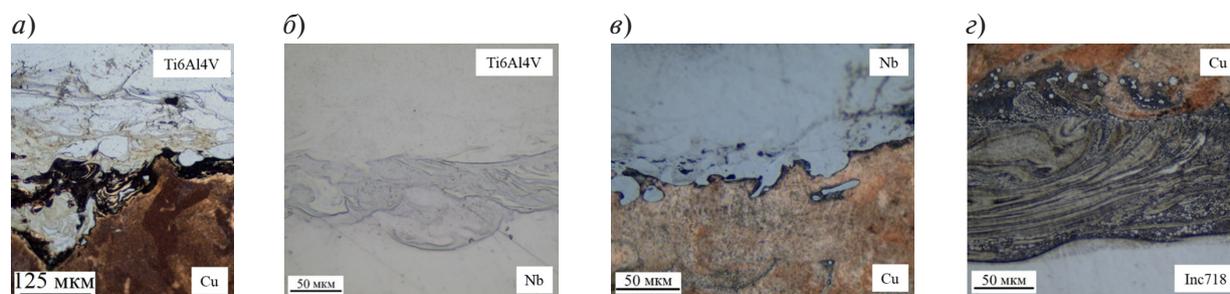


Рис. 3. Исследование микроструктуры в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) переходная зона Ti6Al4V/Cu; б) переходная зона Ti6Al4V/Nb; в) переходная зона Nb/Cu; г) переходная зона Inconel 718/Cu

Fig. 3. Microstructure analysis in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Ti6Al4V/Cu interfacial zone; б) Ti6Al4V/Nb interfacial zone; в) Nb/Cu interfacial zone; д) Inconel 718/Cu interfacial zone

резкий переход по изменению химического состава от Inconel 718 к Cu (рис. 4а). При этом количество самой меди изменяется более плавно, как и при ее переходе к Ti6Al4V. Здесь необходимо точнее описать понятие «переходная зона» – это зона на границе раздела двух материалов, в которой наблюдается непостоянство химического состава (отличного от заданного состава сплава или металла). Резкое изменение химического состава может говорить о том, что переходная зона имеет небольшую ширину, а более плавное изменение – об увеличенной ширине. Можно предположить, что переходная зона между Cu и Ti6Al4V будет больше, чем между Cu и Inconel 718. Также видно, что в переходной зоне Ti6Al4V/Cu возникают области с более глубоким перемешиванием металлов (рис. 4а). Неравномерность перемешивания компонентов сплавов может быть вызвана выбранной стратегией сканирования слоя. На каждом новом слое сканирование происходило с поворотом, что могло вызвать неравномерность проплавления слоев.

Так же, как и в переходной зоне Inconel 718/Cu, в Ti6Al4V/Nb имеется достаточно резкий переход (рис. 4б). Противоположная картина наблюдается в переходной зоне Nb/Cu, где присутствует постепенный переход от одного элемента к другому, что подтверждается изображением исследуемой области. Видно, что форма областей перемешивания соответствует форме

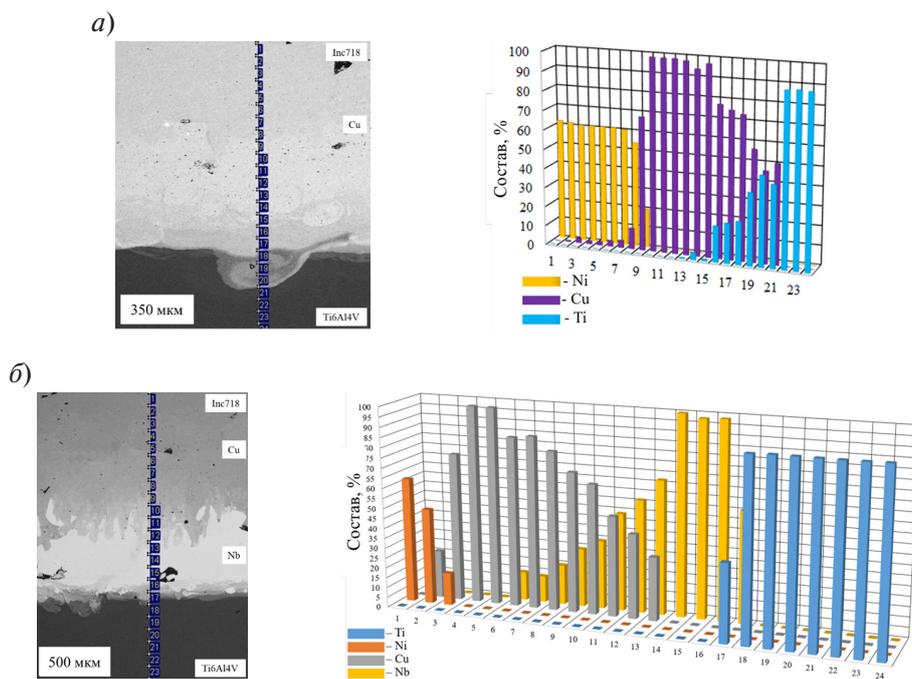


Рис. 4. Исследование химического состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) мультиматериал Inconel 718/Cu/Ti6Al4V; б) мультиматериал Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V

Fig. 4. Chemical composition study in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Inconel 718/Cu/Ti6Al4V multi-material sample; б) Inconel 718/Cu/Nb/Ti6Al4V multi-material sample

бассейна расплава, когда плавление слоя порошка происходит в режиме «замочной скважины» [41]. Также можно отметить, что вблизи границы Ti6Al4V/Nb и Nb/Cu имеются дефекты – раковины. Они могут образовываться по причине несоответствия параметров процесса составу, который возникает из-за перемешивания металлов и сплавов. Дополнительной причиной может быть то, что параметры для Nb и Cu имеют достаточно высокие значения объемной плотности энергии, и изменение состава может оказывать более существенное влияние на дефектообразование. Наличие переходной зоны носит двойственный характер. С одной стороны, ее присутствие снижает количество концентраторов напряжений, которые могут возникать в случае резкой границы раздела материалов. С другой стороны, при смешивании двух составов возможно образование дефектов из-за несоответствия параметров печати составу, а также образование нежелательных фаз.

На рис. 5 представлены результаты исследований фазового состава мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu и Cu+Nb.

Из рис. 5 видно, что в процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. В зоне сплавов присутствуют характерные для них фазы так же, как и для Cu с Nb. Взаимодействие сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 может привести к формированию таких охрупчивающих интерметаллидов, как $TiNi_3$ и Ti_2Ni . Однако они не наблюдаются на полученных дифрактограммах, что может говорить либо об их отсутствии, либо об их минимальном количестве. Таким образом, можно отметить, что удалось избежать формирования охрупчивающих интерметаллидов при изготовлении мультиматериальных образцов Ti6Al4V и Inconel 718. Кроме того, взаимодействие сплава Ti6Al4V с Cu может стать причиной образования охрупчивающего интерметаллида $CuTi_2$ [42]. Однако прослойка между Ti6Al4V и Cu в виде Nb позволяет предотвратить образование данного интерметаллида.

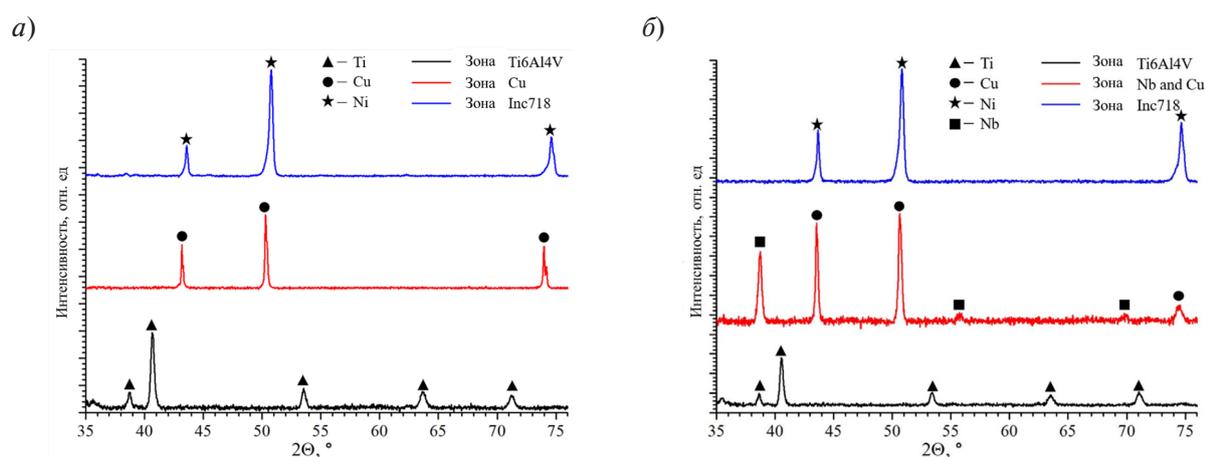


Рис. 5. Исследование фазового состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) мультиматериал Inconel 718/Cu/Ti6Al4V; б) мультиматериал Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V

Fig. 5. Phase composition study in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Inconel 718/Cu/Ti6Al4V multi-material sample; б) Inconel 718/Cu/Nb/Ti6Al4V multi-material sample

По результатам анализа микротвердости мультиматериальных образцов Ti6Al4V/ Inconel 718 с переходным слоем из Cu и Cu+Nb видно, что отсутствуют резкие скачки в значениях твердости при переходах от сплава к сплаву на протяжении всего измерения. С учетом того, что был выбран достаточно мелкий шаг измерений микротвердости (100 мкм), отсутствие резких скачков подтверждает факт того, что количество интерметаллидов минимально или они отсутствуют вовсе. Говоря о полученных значениях микротвердости, можно отметить, что они соответствуют средним значениям для исследуемых сплавов. Кроме того, по изменению значений микротвердости можно отметить, что ширина переходной зоны между сплавами имеет небольшие размеры, так как не наблюдается градиентного снижения твердости, а происходит ее резкое изменение. Исключением является переходная зона Nb/Cu, так как в ней наблюдается более плавный переход, что подтверждает выводы об исследовании химического состава данной зоны (наличие широкой переходной зоны).

В табл. 3 представлены результаты исследования механических свойств мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718. Из результатов анализа мультиматериалов с переходным слоем из Cu видно, что между собой значения свойств отличаются несущественно, что говорит о хорошей повторяемости печати. Предел прочности достигает 790 МПа, что является достаточно высоким значением. Однако полученные результаты по значениям находятся ниже свойств Ti6Al4V и Inconel 718. Это может быть связано с наличием неконтролируемых механических свойств в переходных зонах и наличием Cu с низкими механическими свойствами. Также стоит отметить достаточно невысокий предел текучести – примерно 150 МПа. Можно предположить, что низкий предел текучести обуславливается механикой разрушения мультиматериальных образцов, когда в процессе растяжения первым в пластическое состояние переходит Cu, который имеет достаточно низкие значения механических свойств. Далее ввиду мультиматериального строения происходит переход в пластическое состояние других металлов. Возможное повышение свойств может быть достигнуто за счет проведения термической обработки и подбора более высокопрочного переходного слоя. Кроме того, можно исследовать влияние толщины слоев Cu и Nb на механические свойства. Также можно провести работу по оптимизации параметров процесса в межфазных зонах для уменьшения количества и размера островных макросегрегаций.

Таблица 3

Исследование механических свойств мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb

Table 3

Study of mechanical properties of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material samples with Cu and Cu+Nb interlayer

Переходный слой	№ образца	Свойства		
		Предел текучести	Предел прочности	Относительное удлинение
		МПа		%
Cu	1	150,02	784,23	13,74
	2	153,38	786,34	11,14
	3	147,44	792,32	10,36
	Ср. знач.	150,28±2,07	787,6±3,15	11,75±1,33
Cu+Nb	1	145,77	891,72	15,51
	2	114,06	915,93	18,91
	3	151,71	910,7	13,51
	Ср. знач.	137,18±15,41	906,11±9,6	15,98±1,96

Мультиматериальные образцы Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu+Nb имеют значения свойств выше, чем мультиматериальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Наблюдается аналогичная картина по величине свойств – достаточно высокие значения предела прочности (достигают 910 МПа), но ниже свойств сплавов. Также аналогичной является ситуация с пределом текучести – достаточно невысокие значения. Можно выдвинуть аналогичные объяснения такого поведения мультиматериала – наличие переходных слоев из чистых металлов снижает свойства образцов. Однако стоит отметить, что присутствует повышение свойств при использовании комбинации Cu+Nb. Это может быть объяснено тем, что, хотя не было выявлено наличие охрупчивающих интерметаллидов в мультиматериале с переходным слоем Cu, они все равно могут присутствовать и снижать свойства. Кроме того, физико-термические свойства, например такие как коэффициент теплового расширения и теплопроводность между Ti6Al4V и Nb, отличаются не так существенно, как между Ti6Al4V и Cu.

Выводы

В данной работе были проведены исследования мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb, полученных методом СЛП, в частности формирование микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов. Проведена оценка влияния использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) В областях сплавов (Ti6Al4V и Inconel 718) отсутствуют существенные дефекты, но они встречаются в областях Cu и Nb, а также в переходной зоне Cu/Nb. Переходные зоны Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu имеют достаточно резкий переход по изменению химического состава. Схожая картина наблюдается в переходной зоне Ti6Al4V/Cu, а в переходной зоне Nb/Cu присутствует постепенный переход от одного элемента к другому. Наблюдается эффект формирования островковой макросегрегации во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. В процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. В зоне сплавов присутствуют характерные для них фазы так же, как и для Cu с Nb.

2) Микротвердость в зонах сплавов и металлов соответствует средним значениям для каждого из них. Изменение значений микротвердости при переходе от сплавов к чистым металлам имеет резкий переход. Однако в переходной зоне Nb/Cu наблюдается более плавный переход. Мульти материальные образцы с переходным слоем Cu+Nb имеют значения механических свойств выше, чем мульти материальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Предел прочности мульти материального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, а с переходными слоями Cu+Nb достигает 910 МПа, что является достаточно высокими значениями, но ниже свойств сплавов Inconel 718 или Ti6Al4V.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Vaghasia V., Parmar H., Chaudhari R., Vora J.K., Abhishek K., Kumari S.** Recent advancements in the fabrication of multi-material structures by additive manufacturing, *AIP Conference Proceedings*, 2960 (1) (2024) 030017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0183002>
- [2] **Putra N.E., Mirzaali M.J., Apachitei I., Zhou J., Zadpoor A.A.** Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution, *Acta Biomaterialia*, 109 (2020) 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.037>
- [3] **Rafiee M., Farahani R.D., Therriault D.** Multi-Material 3D and 4D printing: A survey, *Advanced Science*, 7 (12) (2020) 1902307. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>
- [4] **Verma A., Kapil A., Klobčar D., Sharma A.** A review on multiplicity in multi-material additive manufacturing: Process, capability, scale, and structure, *Materials*, 16 (15) (2023) 5246. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155246>
- [5] **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*, 6 (1) (2022) 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
- [6] **Han D., Lee H.** Recent advances in multi-material additive manufacturing: Methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28 (2020) 158–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
- [7] **Mussatto A.** Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: A review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100769>
- [8] **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*, 283 (2020) 116701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116701>
- [9] **Wei C., Li L., Zhang X., Chueh Y.-H.** 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting, *CIRP Annals*, 67 (1) (2018) 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.096>
- [10] **Chen J., Yang Y., Song C., Zhang M., Wu S., Wang D.** Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L /CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 752 (2019) 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.097>
- [11] **Chen J., Yang Y., Song C., Wang D., Wu S., Zhang M.** Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10, *Materials Science and Engineering: A*, 792 (2020) 139316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139316>
- [12] **Yusuf S.M., Mazlan N., Musa N.H., Zhao X., Chen Y., Yang S., Nordin N.A., Mazlan S.A., Gao N.** Microstructures and hardening mechanisms of a 316L Stainless Steel/Inconel 718 interface additively manufactured by multi-material selective laser melting, *Metals*, 13 (2) (2023) 400. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13020400>

[13] **Mei X., Wang X., Peng Y., Gu H., Zhong G., Yang S.** Interfacial characterization and mechanical properties of 316L Stainless Steel/Inconel 718 manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 758 (2019) 185–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.011>

[14] **Hinojos A., Mireles J., Reichardt A., Frigola P., Hosemann P., Murr L.E., Wicker R.B.** Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology, *Materials & Design*, 94 (2016) 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041>

[15] **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, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (2022) 2113–2123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>

[16] **Walker J., Middendorf J.R., Lesko C.C.C., Gockel J.** Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing in 3-dimensions, *Manufacturing Letters*, 31 (2022) 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.011>

[17] **Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Шамшурин А.И.** Создание мультиматериальных образцов системы ВЖ159-БрХЦрТ методом селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 175–188. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29211>

[18] **Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Голубков Н.А.** Исследование механических свойств мультиматериальных образцов системы ВЖ159-БрХЦрТ, полученных методом селективного лазерного плавления // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2024. Т. 18, № 1. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

[19] **Wang R., Gu D., Lin K., Chen C., Ge Q., Li D.** Multi-material additive manufacturing of a bio-inspired layered ceramic/metal structure: Formation mechanisms and mechanical properties, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 175 (2022) 103872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103872>

[20] **Tey C.F., Tan X., Sing S.L., Yeong W.Y.** Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100970>

[21] **Scaramuccia M.G., Demir A.G., Caprio L., Tassa O., Previtali B.** Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.010>

[22] **Shang C., Wang C., Li C., Yang G., Xu G., You J.** Eliminating the crack of laser 3D printed functionally graded material from TA15 to Inconel 718 by base preheating, *Optics & Laser Technology*, 126 (2020) 106100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106100>

[23] **Wu D., Song C., Di T., Niu F., Ma G.** Intermetallic regulation mechanism of Inconel 718/Ti6Al4V composite by novel follow-up ultrasonic assisted laser additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 235 (2022) 109736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109736>

[24] Meng W., Xiaohui Y., Zhang W., Junfei F., Lijie G., Qunshuang M., Bing C. Additive manufacturing of a functionally graded material from Inconel625 to Ti6Al4V by laser synchronous preheating, *Journal of Materials Processing Technology*, 275 (2020) 116368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116368>

[25] **Godec M., Malej S., Feizpour D., Donik Č., Balažic M., Klobčar D., Pambaguian L., Conradi M., Kocijan A.** Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Materials Characterization*, 172 (2021) 110842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>

[26] **Marques A., Cunha A., Gasik M., Carvalho O., Silva F.S., Bartolomeu F.** 3D multi-material laser powder bed fusion: Ti6Al4V–CuNi2SiCr parts for aerospace applications, *Progress in Additive Manufacturing*, 9 (2023) 391–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00460-5>

[27] **Song C., Ma G., He A., Li Y., Niu F., Wu D.** Multi-phases transformation mechanism of Ti6Al4V/Inconel 718 composite by laser additive manufacturing, *Materials Characterization*, 179 (2021) 111363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111363>

- [28] **Godfrey D.G., Morris M.C., Menon M.** Multi-material turbine components, U.S. Patent, No. US9266170B2 (2016).
- [29] **Rockstroh T.J., Tewari S.K., Sabato J.G., Desander D.B., Abbott D.H., Gledhill M.D.** Turbine airfoil casting method, U.S. Patent, No. US20090165988A1 (2009).
- [30] **Li Q.** A study on dissimilar metal functionally graded material via multi-material selective laser melting, PhD thesis, Manchester (UK), 2023.
- [31] **Ng C.H., Mok E.S.H., Man H.C.** Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 226 (2015) 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmat-protec.2015.06.039>
- [32] **Shamsolhodaie A., Oliveira J.P., Schell N., Maawad E., Panton B., Zhou Y.N.** Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel, *Intermetallics*, 116 (2020) 106656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106656>
- [33] **Niu H., Jiang H.C., Zhao M.J., Rong L.J.** Effect of interlayer addition on microstructure and mechanical properties of NiTi/stainless steel joint by electron beam welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 61 (2021) 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.043>
- [34] **Wang H., Xie J., Chen Y., Liu W., Zhong W.** Effect of CoCrFeNiMn high entropy alloy interlayer on microstructure and mechanical properties of laser-welded NiTi/304 SS joint, *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (2022) 1028–1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.022>
- [35] **Onuikie B., Bandyopadhyay A.** Additive manufacturing of Inconel 718 – Ti6Al4V bimetallic structures, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 844–851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.025>
- [36] **Thiriet A., Schneider-Maunoury C., Laheurte P., Boisselier D., Weiss L.** Multiscale study of different types of interface of a buffer material in powder-based directed energy deposition: Example of Ti6Al4V/Ti6Al4V – Mo/Mo – Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 27 (2019) 118–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.007>
- [37] **Jeong H.-I., Kim D.-H., Lee C.-M.** Multi-material deposition of Inconel 718 and Ti–6Al–4V using the Ti–Nb–Cr–V–Ni high entropy alloy intermediate layer, *Journal of Materials Research and Technology*, 29 (2024) 3217–3227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.285>
- [38] **Soysal T., Kou S., Tat D., Pasang T.** Macrosegregation in dissimilar-metal fusion welding, *Acta Materialia*, 110 (2016) 149–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.004>
- [39] **Wang P., Huang P., Ng F.L., Sin W.J., Lu S., Nai M.L.S., Dong Z.L., Wei J.** Additively manufactured CoCrFeNiMn high-entropy alloy via pre-alloyed powder, *Materials & Design*, 168 (2019) 107576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107576>
- [40] **Repnin A., Kim A., Popovich A.** Interfacial characterization of selective laser melting of a SS316L/NiTi multi-material with a high-entropy alloy interlayer, *Crystals*, 13 (10) (2023) 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101486>
- [41] **Shrestha S., Starr T., Chou K.** A study of keyhole porosity in selective laser melting: Single-track scanning with micro-CT analysis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141 (7) (2019) 071004. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043622>
- [42] **Fan Y., Fan J., Wang C.** Formation of typical Cu–Ti intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach, *Intermetallics*, 113 (2019) 106577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106577>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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] **V. Vaghasia, H. Parmar, R. Chaudhari, J.K. Vora, K. Abhishek, S. Kumari**, Recent advancements in the fabrication of multi-material structures by additive manufacturing, *AIP Conference Proceedings*, 2960 (1) (2024) 030017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0183002>
- [2] **N.E. Putra, M.J. Mirzaali, I. Apachitei, J. Zhou, A.A. Zadpoor**, Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution, *Acta Biomaterialia*, 109 (2020) 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.037>
- [3] **M. Rafiee, R.D. Farahani, D. Therriault**, Multi-Material 3D and 4D printing: A survey, *Advanced Science*, 7 (12) (2020) 1902307. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>
- [4] **A. Verma, A. Kapil, D. Klobčar, A. Sharma**, A review on multiplicity in multi-material additive manufacturing: Process, capability, scale, and structure, *Materials*, 16 (15) (2023) 5246. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155246>
- [5] **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) (2022) 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
- [6] **D. Han, H. Lee**, Recent advances in multi-material additive manufacturing: Methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28 (2020) 158–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
- [7] **A. Mussatto**, Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: A review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100769>
- [8] **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: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116701>
- [9] **C. Wei, L. Li, X. Zhang, Y.-H. Chueh**, 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting, *CIRP Annals*, 67 (1) (2018) 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.096>
- [10] **J. Chen, Y. Yang, C. Song, M. Zhang, S. Wu, D. Wang**, Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L/CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 752 (2019) 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.097>
- [11] **J. Chen, Y. Yang, C. Song, D. Wang, S. Wu, M. Zhang**, Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10, *Materials Science and Engineering: A*, 792 (2020) 139316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139316>
- [12] **S.M. Yusuf, N. Mazlan, N.H. Musa, X. Zhao, Y. Chen, S. Yang, N.A. Nordin, S.A. Mazlan, N. Gao**, Microstructures and hardening mechanisms of a 316L Stainless Steel/Inconel 718 interface additively manufactured by multi-material selective laser melting, *Metals*, 13 (2) (2023) 400. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13020400>

- [13] **X. Mei, X. Wang, Y. Peng, H. Gu, G. Zhong, S. Yang**, Interfacial characterization and mechanical properties of 316L Stainless Steel/Inconel 718 manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 758 (2019) 185–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.011>
- [14] **A. Hinojos, J. Mireles, A. Reichardt, P. Frigola, P. Hosemann, L.E. Murr, R.B. Wicker**, Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology, *Materials & Design*, 94 (2016) 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041>
- [15] **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, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (2022) 2113–2123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>
- [16] **J. Walker, J.R. Middendorf, C.C.C. Lesko, J. Gockel**, Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing in 3-dimensions, *Manufacturing Letters*, 31 (2022) 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.011>
- [17] **A.V. Repnin, A.V. Borisov, A.A. Popovich, A.I. Shamshurin**, Selective laser melting of multimaterial VZh159-CuCr1Zr samples, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 175–188, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29211>
- [18] **A.V. Repnin, A.V. Borisov, A.A. Popovich, N.A. Golubkov**, Mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr alloy multi-material samples manufactured by selective laser melting, *Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya)*, 18 (1) (2024) 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>
- [19] **R. Wang, D. Gu, K. Lin, C. Chen, Q. Ge, D. Li**, Multi-material additive manufacturing of a bio-inspired layered ceramic/metal structure: Formation mechanisms and mechanical properties, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 175 (2022) 103872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103872>
- [20] **C.F. Tey, X. Tan, S.L. Sing, W.Y. Yeong**, Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100970>
- [21] **M.G. Scaramuccia, A.G. Demir, L. Caprio, O. Tassa, B. Previtali**, Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.010>
- [22] **C. Shang, C. Wang, C. Li, G. Yang, G. Xu, J. You**, Eliminating the crack of laser 3D printed functionally graded material from TA15 to Inconel 718 by base preheating, *Optics & Laser Technology*, 126 (2020) 106100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106100>
- [23] **D. Wu, C. Song, T. Di, F. Niu, G. Ma**, Intermetallic regulation mechanism of Inconel 718/Ti6Al4V composite by novel follow-up ultrasonic assisted laser additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 235 (2022) 109736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109736>
- [24] **W. Meng, Y. Xiaohui, W. Zhang, F. Junfei, G. Lijie, M. Qunshuang, C. Bing**, Additive manufacturing of a functionally graded material from Inconel625 to Ti6Al4V by laser synchronous preheating, *Journal of Materials Processing Technology*, 275 (2020) 116368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116368>
- [25] **M. Godec, S. Malej, D. Feizpour, Č. Donik, M. Balažić, D. Klobčar, L. Pambaguian, M. Conradi, A. Kocijan**, Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Materials Characterization*, 172 (2021) 110842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>
- [26] **A. Marques, A. Cunha, M. Gasik, O. Carvalho, F.S. Silva, F. Bartolomeu**, 3D multi-material laser powder bed fusion: Ti6Al4V–CuNi2SiCr parts for aerospace applications, *Progress in Additive Manufacturing*, 9 (2023) 391–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00460-5>
- [27] **C. Song, G. Ma, A. He, Y. Li, F. Niu, D. Wu**, Multi-phases transformation mechanism of Ti6Al4V/Inconel 718 composite by laser additive manufacturing, *Materials Characterization*, 179 (2021) 111363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111363>

- [28] **D.G. Godfrey, M.C. Morris, M. Menon**, Multi-material turbine components, U.S. Patent, No. US9266170B2 (2016).
- [29] **T.J. Rockstroh, S.K. Tewari, J.G. Sabato, D.B. Desander, D.H. Abbott, M.D. Gledhill**, Turbine air-foil casting method, U.S. Patent, No. US20090165988A1 (2009).
- [30] **Q. Li**, A study on dissimilar metal functionally graded material via multi-material selective laser melting, PhD thesis, Manchester (UK), 2023.
- [31] **C.H. Ng, E.S.H. Mok, H.C. Man**, Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 226 (2015) 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.039>
- [32] **A. Shamsolhodaei, J.P. Oliveira, N. Schell, E. Maawad, B. Panton, Y.N. Zhou**, Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel, *Intermetallics*, 116 (2020) 106656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106656>
- [33] **H. Niu, H.C. Jiang, M.J. Zhao, L.J. Rong**, Effect of interlayer addition on microstructure and mechanical properties of NiTi/stainless steel joint by electron beam welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 61 (2021) 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.043>
- [34] **H. Wang, J. Xie, Y. Chen, W. Liu, W. Zhong**, Effect of CoCrFeNiMn high entropy alloy interlayer on microstructure and mechanical properties of laser-welded NiTi/304 SS joint, *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (2022) 1028–1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.022>
- [35] **B. Onuikie, A. Bandyopadhyay**, Additive manufacturing of Inconel 718 – Ti6Al4V bimetallic structures, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 844–851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.025>
- [36] **A. Thiriet, C. Schneider-Maunoury, P. Laheurte, D. Boisselier, L. Weiss**, Multiscale study of different types of interface of a buffer material in powder-based directed energy deposition: Example of Ti6Al4V/Ti6Al4V – Mo/Mo – Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 27 (2019) 118–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.007>
- [37] **H.-I. Jeong, D.-H. Kim, C.-M. Lee**, Multi-material deposition of Inconel 718 and Ti–6Al–4V using the Ti–Nb–Cr–V–Ni high entropy alloy intermediate layer, *Journal of Materials Research and Technology*, 29 (2024) 3217–3227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.285>
- [38] **T. Soysal, S. Kou, D. Tat, T. Pasang**, Macrosegregation in dissimilar-metal fusion welding, *Acta Materialia*, 110 (2016) 149–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.004>
- [39] **P. Wang, P. Huang, F.L. Ng, W.J. Sin, S. Lu, M.L.S. Nai, Z.L. Dong, J. Wei**, Additively manufactured CoCrFeNiMn high-entropy alloy via pre-alloyed powder, *Materials & Design*, 168 (2019) 107576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107576>
- [40] **A. Repnin, A. Kim, A. Popovich**, Interfacial characterization of selective laser melting of a SS316L/NiTi multi-material with a high-entropy alloy interlayer, *Crystals*, 13 (10) (2023) 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101486>
- [41] **S. Shrestha, T. Starr, K. Chou**, A study of keyhole porosity in selective laser melting: Single-track scanning with micro-CT analysis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141 (7) (2019) 071004. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043622>
- [42] **Y. Fan, J. Fan, C. Wang**, Formation of typical Cu–Ti intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach, *Intermetallics*, 113 (2019) 106577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106577>

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: 30.10.2024; Одобрена: 08.01.2025; Принята: 10.01.2025.

Submitted: 30.10.2024; Approved: 08.01.2025; Accepted: 10.01.2025.