



УДК 621.762

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

Научная статья

Research article



Исследование механических свойств мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ, полученных методом селективного лазерного плавления

А. В. Репнин[✉], Е. В. Борисов, А. А. Попович, Н. А. ГолубковСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 repnin_arseniy@mail.ru

Аннотация. Используя метод селективного лазерного плавления, можно успешно получать мультиматериальные изделия. Такие изделия будут обладать повышенными эксплуатационными характеристиками. Цель данной работы – изучение механических свойств мультиматериальной системы ВЖ159–БрХЦрТ В, полученной методом селективного лазерного плавления. Были проведены испытания ее образцов на растяжение и сжатие, после чего осуществлена их фрактография, исследованы шлифы после сжатия, выполнено сравнение полученных механических свойств с литературными данными. В результате сделаны следующие выводы: в зонах чистых сплавов фазовый состав представляет собой соответствующие твердые растворы, в переходной зоне наблюдаются пики, расположение которых соответствует пикам из обоих сплавов. При испытаниях на растяжение предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В составил $\sigma_b = 430 \pm 20$ МПа, относительное удлинение $\varepsilon = 4,6 \pm 0,3$ %, результаты на сжатие – $\sigma_b = 822 \pm 23$ МПа, относительное сжатие $\varepsilon = 42,5 \pm 1,5$ %. По сравнению с чистым сплавом БрХЦрТ В предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ при испытаниях на растяжение выше на ~53 % (при сопоставлении с литературными данными), условный предел текучести в экспериментах на сжатие – на ~80 %. Фрактография мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение свидетельствует о том, что переходной зоне присущи признаки как более вязкого разрушения, характерного для сплава БрХЦрТ В (наличие ямок и отсутствие гладкого рельефа), так и менее вязкого, характерного для сплава ВЖ159 (наличие микротрещин). Исследование шлифа мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после испытаний на сжатие показало, что наличие в переходной зоне более вязкого сплава БрХЦрТ В способствует остановке развития трещины.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, мультиматериалы, механические свойства, фрактография, распространение трещины, 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., Голубков Н.А. Исследование механических свойств мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ, полученных методом селективного лазерного плавления. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(1):52–61. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

Mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr alloy multi-material samples manufactured by selective laser melting

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

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytekhnicheskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation

 repnin_arseniy@mail.ru

Abstract. Selective laser melting (SLM) proves to be a suitable method for fabricating multi-material products, offering heightened performance. The objective of this study is to examine the mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr multi-material system produced through selective laser melting. We conducted tensile and compressive strength tests on these samples, followed by fractography, examination of polished sections, and a comparison of measured mechanical properties with existing data. Our findings are summarized as follows: the phase compositions in the regions of pure alloy denote solid solutions. X-ray diffraction (XRD) patterns of the interface zone reveal peaks corresponding to both alloys. The tensile strength of VZh159–CuCr1Zr multi-material samples, as measured in tensile tests, is $\sigma_u = 430 \pm 20$ MPa, with a relative elongation of $\varepsilon = 4.6 \pm 0.3$ %. Results from compressive strength tests show values of $\sigma_u = 822 \pm 23$ MPa, and relative compression $\varepsilon = 42.5 \pm 1.5$ %. Comparing these values with those of the pure CuCr1Zr alloy, the ultimate tensile strength is approximately 53 % higher (according to available data), while the conditional yield strength is about 80 % higher. Fractography of the VZh159–CuCr1Zr multi-material sample after tensile tests indicates that the interface zone exhibits both more ductile fracture features characteristic of the CuCr1Zr alloy (pits and a lack of a smooth surface) and less ductile features characteristic of the VZh159 alloy (microcracks). Examination of the polished section of a VZh159–CuCr1Zr multi-material sample after compressive strength tests reveals that the presence of a more ductile CuCr1Zr alloy in the interface zone contributes to arresting the crack, which propagates at a 45° angle to the direction of load application in the VZh159 alloy region.

Keywords: selective laser melting, multi-materials, mechanical properties, fractography, crack propagation, VZh159–CuCr1Zr

Acknowledgements: This study received support from Grant No. 23-79-30004 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

For citation: Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Golubkov N.A. Mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr alloy multi-material samples manufactured by selective laser melting. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(1):52–61. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

Введение

В последнее время идет активное внедрение аддитивных технологий (АТ) в производственные цепочки таких высокотехнологичных отраслей промышленности, как нефтехимическая отрасль, машиностроение, электроэнергетика и т.д. [1]. Подобного рода тенденция в том числе связана с тем, что данный вид технологий предоставляет возможность получения сложнопрофильных изделий с более низкими затратами на производство по сравнению с традиционными методами [2]. Для создания изделий из металлов и сплавов можно использовать различные виды АТ – экструзию материала, листовую ламинацию, струйное нанесение связующего, прямой подвод энергии и материала, а также синтез на подложке. Последний метод заключается в формировании готового изделия посредством сплавления тонких слоев металлического порошка энергетическим источником согласно заданной 3D-модели [3–5].

Используя метод селективного лазерного плавления (СЛП), имеется возможность получать изделия с переменным химическим составом. Применение данного подхода позволяет повысить их эксплуата-

ционные характеристики [6]. Такие изделия условно можно разделить на две группы – функционально-градиентные материалы и мультиматериалы [7]. В работе [8] проводили исследования мультиматериальной системы 316L/CuSn10 (316L – аустенитная нержавеющая сталь, CuSn10 – оловянная бронза). Методом СЛП были успешно изготовлены компактные образцы без макротрещин в переходной зоне. Результаты показали, что микротвердость по Виккерсу постепенно снижалась с 330 HV в области 316L до 173 HV в области CuSn10. Предел прочности на растяжение и на изгиб мультиматериальных образцов 316L/CuSn10 находился в интервале между значениями прочности для 316L и CuSn10. Напряжение сдвига образца 316L/CuSn10 составило 210 МПа, что выше, чем у сплавов данной системы, полученной другими способами изготовления.

В работе [9] изучали ту же мультиматериальную систему и тот же производственный процесс. В направлении, перпендикулярном переходной зоне, значение микротвердости по Виккерсу изменялось с 230 HV в области 316L до 155 HV в области CuSn10. Предел прочности мультиматериальных образцов 316L/CuSn10 составил 420 МПа; кривые и характе-

ристики разрушения показали, что в переходной зоне наблюдается механизм хрупкого разрушения. Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что ширина переходной зоны составляет около 550 мкм, а на границе между ней и стальной областью обнаружены дендритные источники трещин.

Авторы [10] получили методом СЛП и провели исследования образцов системы 316L/IN718 (IN718 – жаропрочный никелевый сплав (ЖНС) Inconel 718). Их предел прочности составил 600 МПа, относительное удлинение – 28 %. По результатам исследований методами оптической и электронной микроскопии, а также энергодисперсионной спектроскопии установлена ширина переходной зоны ~100 мкм, в которой возникают трещины и дефекты. Это обуславливает необходимость отработки параметров печати для переходной зоны мультиматериальных образцов системы 316L/IN718.

Аналогичные исследования проведены в работе [11]. В компактных образцах был достигнут низкий уровень пористости (в среднем ~0,81 %). Металлографический анализ показал, что переходная зона характеризуется плотными сетками дислокаций, в ней присутствуют такие карбиды, как NbC и TiC, и небольшое количество фаз Лавеса (<2 мас. %). Кроме того, межфазная область состояла из равноосных зерен (в среднем 45 мкм), в то время как в областях чистых сплавов наблюдались столбчатые зерна со средним размером 55 и 85 мкм для IN718 и 316L соответственно. Измерения микротвердости по Виккерсу (HV) показали, что значения твердости переходной зоны находятся между значениями твердости областей чистых сплавов.

В работе [12] исследовали систему IN718/GRCor-84 (GRCor-84 – жаропрочная бронза), используя в качестве способа получения изделий технологию прямого лазерного выращивания. Были рассмотрены два подхода получения мультиматериальных образцов – наплавление GRCor-84 на IN718 и создание переходной области с градиентным химическим составом. Вторым способом удалось получить образцы с меньшим количеством дефектов, в то время как первый способ не дал положительных результатов. Металлографические исследования показали, что в переходной зоне имеется столбчатая структура зерен, а также скопление интерметаллидов Cr₂Nb. Теплопроводность мультиматериальных образцов IN718/GRCor-84 оказалась примерно на 250 % больше, чем у чистого сплава IN718.

Авторы [13] изготовили образец, имитирующий камеру сгорания ракетного двигателя, где каналы охлаждения выполнены из чистой меди, а корпус – из жаропрочного никелевого сплава IN718. Области чистого сплава IN718 почти не имели дефектов, однако они присутствовали в медных каналах. Их

ширина была 200 мкм и имела четкую геометрию. При этом ширина переходной зоны составила ~25 мкм. Проведенные исследования не выявили интерметаллидных соединений.

В работе [14] также изготавливали экспериментальный образец, который представлял собой наконечник газовой горелки. Он был выполнен из мультиматериальной системы IN718/CuCr1Zr (CuCr1Zr – жаропрочная бронза): каналы охлаждения – из CuCr1Zr, корпус – из IN718. В результате проведенных исследований было получено, что изделие имеет дефекты, но обладает достаточной технологичностью для его изготовления. Ширина переходной зоны зависит от ее угла наклона относительно направления выращивания. За счет создания изделия с мультиматериальным строением повышается теплопередача. Отмечено, что необходимо уделить внимание разработке оборудования для изготовления мультиматериальных изделий.

В работе [15] было подробно исследовано влияние параметров печати на пористость переходной зоны мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В, а также термической обработки – на микроструктуру, химический и фазовый составы. Было получено, что только существенное повышение энергии приводит к снижению пористости в переходных зонах мультиматериальных образцов. Термическая обработка по режимам, характерным для сплавов БрХЦрТ В и ВЖ159, не оказывает существенного влияния на микроструктуру, химический и фазовый составы переходных зон. Были оценены размеры переходных зон, которые составили 300 мкм при выращивании сплава БрХЦрТ В на ВЖ159. Однако в данной работе не были проведены механические испытания образцов, которые показали бы, как создание мультиматериального строения влияет на их свойства.

Из представленного выше анализа литературных данных следует вывод о том, что, используя метод СЛП, можно успешно получать мультиматериальные изделия. В частности, имеется возможность изготовления изделий таких мультиматериальных систем, как сталь–бронза, сталь–ЖНС и ЖНС–жаропрочная бронза с низким количеством дефектов. Последняя система мало изучена – отсутствует информация о механических свойствах при комнатной и повышенной температурах. В связи с этим целью данной работы было исследование механических свойств мультиматериальной системы ЖНС–жаропрочная бронза (ВЖ159–БрХЦрТ В), полученной методом СЛП. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведены испытания на растяжение и сжатие мультиматериальных образцов; выполнена их фрактография после испытаний на растяжение и изучены шлифы образцов после сжатия; проведено сравнение полученных механических свойств с литературными данными.

Использованные материалы и методы

Изготовление мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В для испытаний на растяжение и сжатие осуществляли на установке селективного лазерного плавления SLM 280HL (SLM Solutions, Германия). Для получения образцов использовались металлические сферические порошки сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В (рис. 1, табл. 1). Оба порошковых материала были изготовлены методом атомизации. Гранулометрический состав порошков определяли на приборе измерения размера частиц методом лазерной дифракции «Analysette 22 NanoTec plus» (Fritsch GmbH, Германия); для сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В он составил, соответственно, мкм: $d_{10} = 17$, $d_{50} = 32$, $d_{90} = 55$ и $d_{10} = 14$, $d_{50} = 29$, $d_{90} = 52$.

При изготовлении мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В методом СЛП

происходила печать сплава БрХЦрТ В на сплаве ВЖ159. С целью минимизации дефектов в переходной зоне (12 слоев) были использованы режимы, отличные от стандартных режимов для ВЖ159 [16] и БрХЦрТ В [17]. Параметры СЛП-процесса мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В представлены в табл. 2. На рис. 2 показаны образцы после изготовления. Их размеры для испытаний на растяжение были следующие, мм: ширина рабочей зоны – 5, ее длина – 20, толщина – 2 (по 1 мм сплавов ВЖ159 и БрХЦрТ В по всей длине образца), ширина захватов – 8,2, их длина – 15. Мультиматериальные образцы для испытаний на сжатие имели следующие размеры, мм: высота – 7, ширина – 4,5, толщина – 6 (по 3 мм сплавов ВЖ159–БрХЦрТ В по всей высоте образца). Образцы для испытаний на сжатие из сплава БрХЦрТ В имели следующие размеры: высота – 8,3 мм, ширина и толщина – 3 мм.

Термическую обработку мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В проводили по режиму, характерному для сплава ВЖ159 [18] который включал 5 стадий:

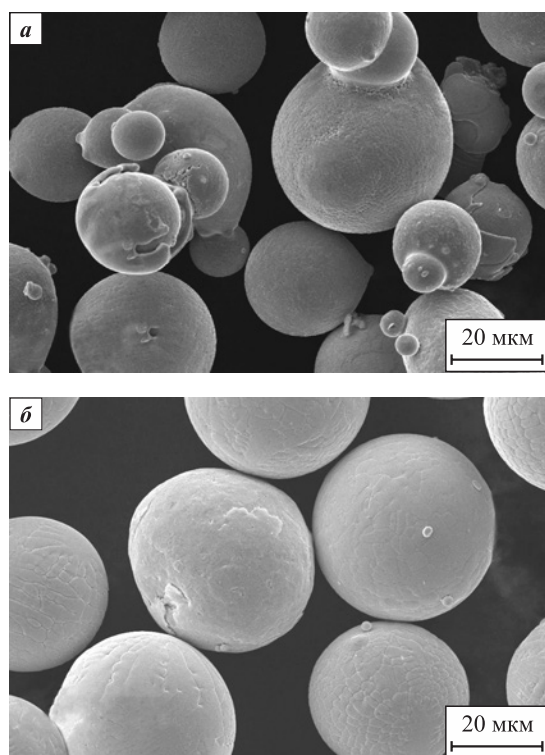


Рис. 1. Морфология металлического порошка

a – сплав ВЖ159, *б* – сплав БрХЦрТ В

Fig. 1. Metal powder morphology

a – VZh159; *б* – CuCr1Zr

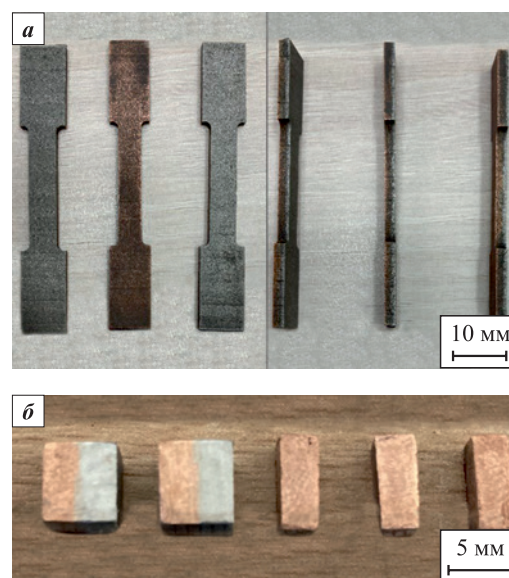


Рис. 2. Мультиматериальные образцы системы ВЖ159–БрХЦрТ В после изготовления методом СЛП и механической обработки

a – образцы на растяжение, *б* – образцы на сжатие

Fig. 2. VZh159–CuCr1Zr multi-material samples after SLM fabrication and machining

a – tensile test samples, *б* – compressive strength samples

Таблица 1. Химический состав, %, порошков ВЖ159 и БрХЦрТ В

Table 1. Chemical composition, %, of VZh159 and CuCr1Zr powders

Сплав	Cr	Ni	Al	Mo	Nb	Cu	Zr
ВЖ159	26–28	Осн.	1,25–1,55	7,0–7,8	2,7–3,4	–	–
БрХЦрТ В	0,4–1,0	До 0,03	–	–	–	Осн.	0,03–0,08

Таблица 2. Параметры СЛП-процесса изготовления мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B

Table 2. SLM parameters for the manufacturing of VZh159–CuCr1Zr multi-material samples

Сплав	Скорость сканирования, мм/с	Мощность лазера, Вт	Расстояние между проходами, мкм	Толщина слоя, мкм	Плотность энергии, Дж/мм ³
ВЖ159	760	275	100	50	72
ВЖ159 + BrXЦpT B (12 слоев)	160	400	150	50	325
BrXЦpT B	300	400	150	50	177

- 1) нагрев до 800 °С (скорость нагрева 10 °С/мин);
- 2) выдержка 8 ч;
- 3) охлаждение до 700 °С с печью;
- 4) выдержка 10 ч;
- 5) охлаждение на воздухе.

Стоит отметить, что провести термическую обработку, которая бы повышала свойства обоих сплавов, достаточно проблематично из-за различия их структурно-фазовых составов. При этом, так как в системе ВЖ159–BrXЦpT B сплав ВЖ159 имеет большую прочность, целесообразнее выполнять термическую обработку для этого сплава. При проведении термической обработки по режиму, характерному для сплава ВЖ159, не происходит изменение свойств в области сплава BrXЦpT B и переходной зоне между сплавами.

Для проведения механических испытаний образцов использовали универсальные одноосные испытательные машины напольного исполнения «Zwick/Roell» (Zwick Roell Group, Германия). Испытания на растяжение проводили на установке Z050 (Zwick/Roell) при скорости растяжения 0,3 мм/мин, на сжатие – на установке Z100 (Zwick/Roell) при скорости сжатия 0,25 мм/мин. Фрактографические исследования мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B выполняли на сканирующем электронном микроскопе «Mira 3» (Tescan, Чехия). Шлиф с трещиной, полученной после испытаний на сжатие, изучали с помощью оптического микроскопа «Leica DMi8 M» (Leica Microsystems, Германия). Фазовый состав анализировали на рентгеновском дифрактометре «Rigaku SmartLab» (Rigaku Corporation, Япония) с возможностью измерения фазового состава в областях от 100 мкм.

Результаты и их обсуждение

Рентгенограммы мультиматериального образца системы ВЖ159–BrXЦpT B в зонах чистых материалов, а также в переходной зоне представлены на рис. 3. В зонах чистых сплавов фазовый состав представляет собой соответствующие твердые растворы. При изучении переходной зоны получены пики, расположение которых соответствует пикам из обоих

сплавов. Исследование проводили при размере пятна излучения, полностью расположенного в переходной зоне (около 150 мкм, переходная зона ~300 мкм). Из-за близости этих пиков происходит их наложение и четко разделить их не представляется возможным, что подтверждается в подобных работах [12]. Каких-либо других фаз рентгеноструктурным анализом обнаружено не было.

На рис. 4 представлены результаты испытаний на растяжение и сжатие мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B и сжатие чистого сплава BrXЦpT B, а в табл. 3 приведено сравнение полученных результатов с литературными данными. Предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B при испытаниях на растяжение составил $\sigma_b = 430 \pm 20$ МПа, а относительное удлинение $\epsilon = 4,6 \pm 0,3$ % (см. табл. 3). При испытаниях на сжатие $\sigma_b = 822 \pm 23$ МПа, а относительное сжатие $\epsilon = 42,5 \pm 1,5$ %.

Сопоставляя полученные результаты испытаний мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B на растяжение с литературными данными (табл. 3), видно, что относительно чистого сплава BrXЦpT B предел прочности увеличивается на ~53 %, при этом относительно чистого сплава

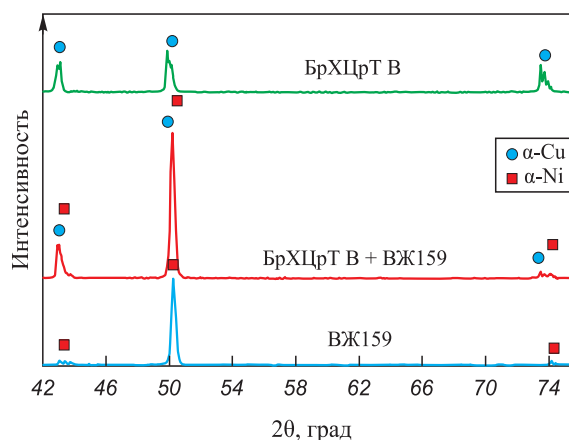


Рис. 3. Фазовый состав мультиматериальных образцов системы ВЖ159–BrXЦpT B

Fig. 3. Phase composition of the VZh159–CuCr1Zr multi-material samples

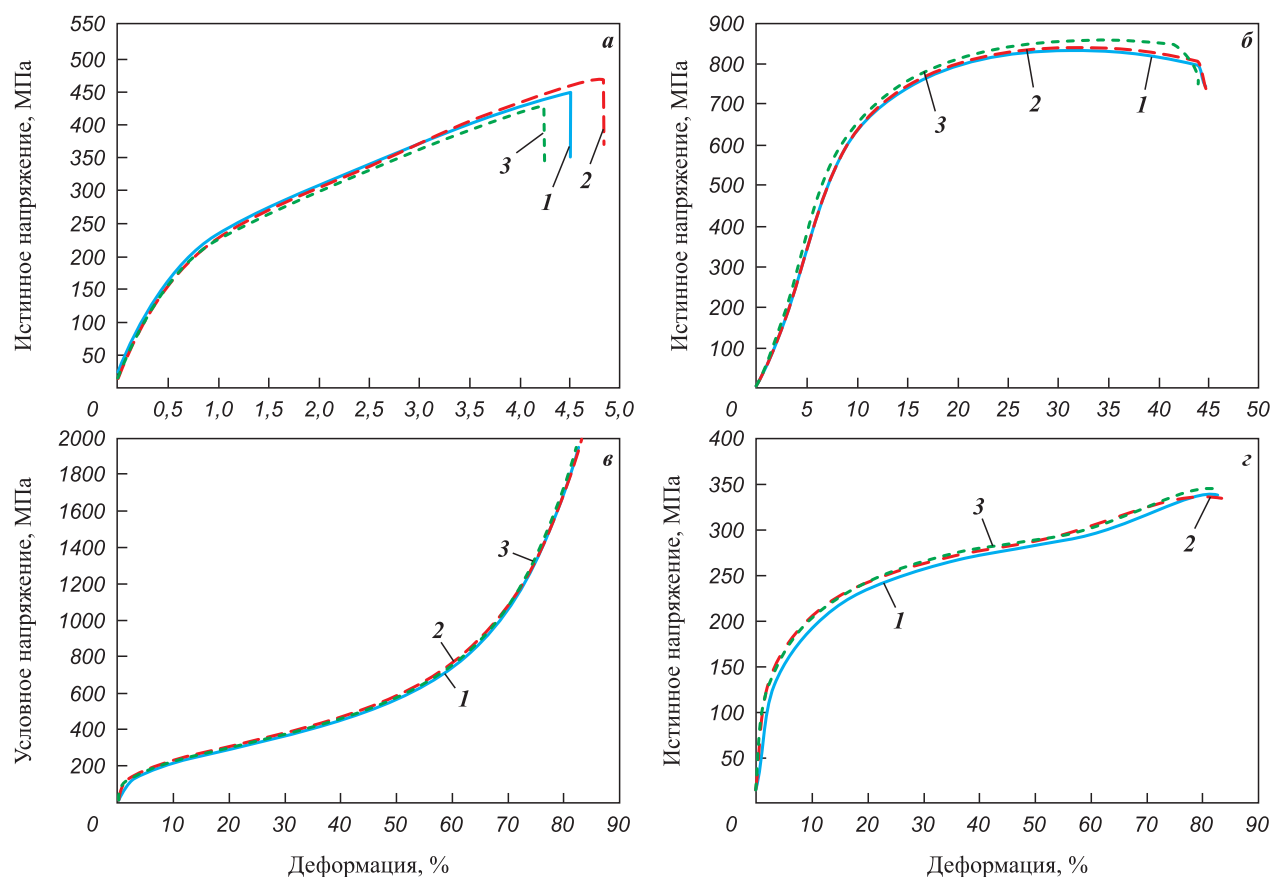


Рис. 4. Диаграмма деформирования при испытаниях на растяжение (а) и сжатие (б) мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В, а также на сжатие чистого сплава БрХЦрТ В (в и г)

Fig. 4. Tensile (a) and compressive (б) stress-strain diagrams of the VZh159–CuCr1Zr system multi-material samples Compressive stress-strain diagram of the pure CuCr1Zr alloy (в and г)

ВЖ159 он уменьшается на ~65 %. Однако прямое сравнение может быть неточным, так как в литературных данных исследовались образцы других форм и размеров. Необходимо учитывать, что расчет напряжений осуществлялся для общей площади поперечного сечения, в которой присутствовали оба сплава. В исследуемых образцах доля каждого из сплавов составляла 50 %. Если выполнить пересчет на напряжения относительно сплава, который в большей степени влияет на прочностные свойства, то значение полученного предела прочности увеличится

в 2 раза и составит 860 МПа. В этом случае уменьшение относительно чистого сплава ВЖ159 составит примерно 29 %. Кроме того, необходимо учесть, что литературные данные [19] получены для образцов, прошедших горячее изостатическое прессование (ГИП), которое повышает механические свойства. В данной работе ГИП не проводилось.

Относительное удлинение мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В при испытаниях на растяжение относительно чистых сплавов БрХЦрТ В и ВЖ159 уменьшается примерно на 66

Таблица 3. Сравнение результатов проведения механических испытаний мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В с литературными данными

Table 3. Comparison of mechanical testing results of the VZh159–CuCr1Zr multi-material samples with available data

Тип испытаний	Мультиматериальные образцы системы ВЖ159–БрХЦрТ (данная работа)		Сплав БрХЦрТ В		Сплав ВЖ159		Испытания сплава «Inconel 718»			
			[17]		[19]		[20]		[21]	
	σ_b , МПа	ε , %	σ_b , МПа	ε , %	σ_b , МПа	ε , %	σ_b , МПа	ε , %	σ_b , МПа	ε , %
Растяжение	430 ± 20	4,6 ± 0,3	203 ± 8	13,5 ± 2,5	1202 ± 13	26 ± 2,5	—	—	—	—
Сжатие	822 ± 23	42,5 ± 1,5	—	—	—	—	1900 ± 10	47 ± 2,5	1800 ± 50	55 ± 5

и 83 % соответственно (см. табл. 3). Такое существенное снижение этого показателя 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.

При сравнении результатов испытаний мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В на сжатие с литературными данными (см. табл. 3) видно, что относительно сплава «Inconel 718» (аналога ВЖ159) предел прочности снижается примерно на 57 % (или на 55 %), а относительное сжатие – на 9 % (или на 22 %). По аналогии с анализом прочностных свойств при растяжении необходимо отметить, что расчет напряжений осуществлялся для общей площади поперечного сечения, в которой присутствовали оба сплава в соотношении 1:1. То есть после пересчета напряжений относительно сплава, который в большей степени влияет на прочностные свойства, уменьшение предела прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В составит 14 или 9 %. Литературные данные [20] и [21] представлены для образцов, прошедших ГИП.

Проведено сравнение результатов сжатия чистого сплава БрХЦрТ В (см. рис. 4, в) с литературными данными [22]. Установлено, что свойства полученных

образцов не ниже, чем у образцов из других работ. При сравнении результатов сжатия мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В (рис. 4, б) с чистым сплавом БрХЦрТ В (рис. 4, в) условный предел текучести (для истинных напряжений, $\sigma_{0,2}$) увеличился примерно на 80 %. Мультиматериальные образцы системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение и сжатие представлены на рис. 5.

На рис. 6 представлена фрактография мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение. Видно,



Рис. 5. Мультиматериальные образцы системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение (а) и сжатие (б)

Fig. 5. VZh159–CuCr1Zr multi-material samples after tensile (a) and compressive strength (b) tests

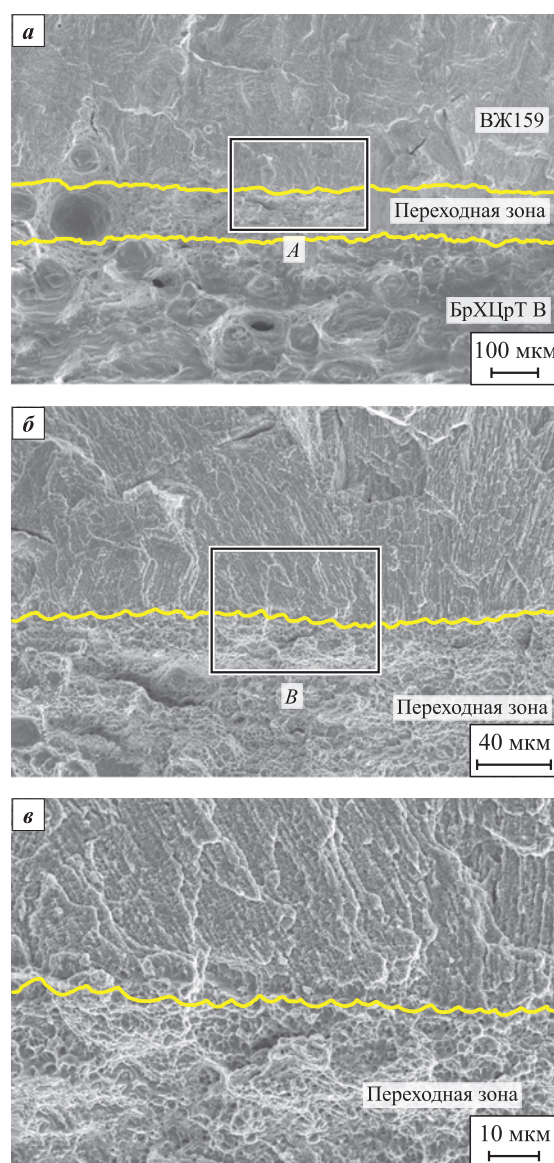


Рис. 6. Фрактография мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение

а – общий вид, б – область А, в – область В

Fig. 6. Fractography of a VZh159–CuCr1Zr multi-material sample after tensile tests

а – general view, б – area A, в – area B

что в области сплава БрХЦрТ В присутствуют ямки различных размеров, а также некоторое количество пор, но микротрещины отсутствуют. Область сплава ВЖ159 характеризуется гладким рельефом излома с некоторым количеством микротрещин. Это свидетельствует о том, что данная область разрушалась более хрупко по сравнению с областью БрХЦрТ В. В переходной зоне присутствуют ямки, отсутствует гладкий рельеф, но имеется некоторое количество микротрещин. Таким образом, можно сделать вывод о том, что переходной зоне присущи признаки как более вязкого разрушения, характерного для сплава БрХЦрТ В (наличие ямок и отсутствие гладкого рельефа), так и менее вязкого, наблюдаемого для сплава ВЖ159 (наличие микротрещин).

На рис. 7 представлен шлиф мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на сжатие и схематично показано изображение трещины. Видно, что трещина образуется под углом 45° относительно направления приложения нагрузки в области ВЖ159, в переходной зоне происходит ее остановка и она не распространяется в области БрХЦрТ В. Можно предположить, что наличие в переходной зоне более вязкого сплава БрХЦрТ В способствует остановке трещины.

Закключение

Рассмотрена мультиматериальная система ВЖ159–БрХЦрТ В. Изучены фазовый состав переходной зоны и такие механические свойства образцов, как предел прочности, относительное удлинение и относительное сжатие, полученные при испытаниях на растяжение и сжатие. Кроме того, проведены их фрактографические исследования после испытаний на растяжение и проанализировано распространение трещины после испытаний на сжатие. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В зонах чистых сплавов фазовый состав представляет собой соответствующие твердые растворы. При исследовании переходной зоны получены пики, расположение которых соответствует пикам из обоих сплавов.

2. Предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В при испытаниях на растяжение составил $\sigma_b = 430 \pm 20$ МПа, относительное удлинение $\varepsilon = 4,6 \pm 0,3$ %, а при испытаниях на сжатие – $\sigma_b = 822 \pm 23$ МПа, относительное сжатие $\varepsilon = 42,5 \pm 1,5$ %.

3. Относительно чистого сплава БрХЦрТ В предел прочности мультиматериальных образцов системы ВЖ159–БрХЦрТ В при испытаниях на растяжение увеличивается примерно на 53 % (при сравнении с литературными данными), а условный предел текучести – на ~80 %.

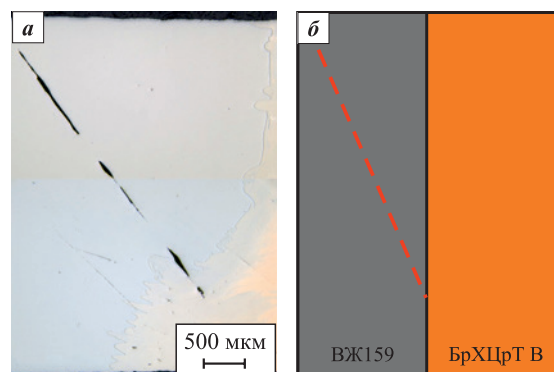


Рис. 7. Шлиф мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на сжатие (а) и схематичное изображение распространения трещины (б)

Fig. 7. Polished section of VZh159–CuCr1Zr multi-material samples after compressive strength tests (a) and approximate crack pattern (b)

4. Фрактография мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на растяжение показала, что переходной зоне присущи признаки как более вязкого разрушения, характерного для сплава БрХЦрТ В (наличие ямок и отсутствие гладкого рельефа), так и менее вязкого, характерного для сплава ВЖ159 (наличие микротрещин).

5. Исследование шлифа мультиматериального образца системы ВЖ159–БрХЦрТ В после проведения испытаний на сжатие показало, что наличие в переходной зоне более вязкого сплава БрХЦрТ В способствует остановке трещины, которая распространяется под углом 45° относительно направления приложения нагрузки в области ВЖ159.

Список литературы / References

1. Srivastava M., Rathee S., Patel V., Kumar A., Koppad P.G. A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:2612–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.015>
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites, Part B: Engineering*. 2018; 143:172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
3. Gunasekaran J., Sevel P., Solomon I.J. Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37(2):252–256. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.162>
4. Negi S., Nambolan A.A., Kapil S., Joshi P.S., Karunakaran K.P., Bhargava P. Review on electron beam based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(3):485–498. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2019-0182>

5. Sefene E.M. State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022;63:250–274.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.002>
6. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness. *Materials Today Communications*. 2023;35:105538.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
7. Nazir A., Gokcekaya O., 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;226:111661.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>
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*. 2020;283:116701.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116701>
9. 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*. 2019;752:75–85.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.097>
10. 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*. 2019;758:185–91.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.011>
11. Yusuf S., 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*. 2023;13(2):400.
<https://doi.org/10.3390/met13020400>
12. Oniuke B., Heer B., Bandyopadhyay A. Additive manufacturing of Inconel 718 – Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENSTM). *Additive Manufacturing*. 2018;21:133–140.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.007>
13. Marques A., Cunha A., 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*. 2022;122:2113–2123.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>
14. Ringel B., Zaepfel M., Herlan F., Horn M., Schmitt M., Seidel C. Advancing functional integration through multi-material additive manufacturing: Simulation and experimental validation of a burner nozzle. *Materials Today: Proceedings*. 2022;70:296–303.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.241>
15. Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Шамшурин А.И. Создание мульти-материальных образцов системы ВЖ159–БрХЦПТ методом селективного лазерного плавления. *Глобальная энергия*. 2023;29(2):175–188. <https://doi.org/10.18721/JEST.29212>
16. Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Shamshurin A.I. Selective laser melting of multi-material VZh159–CuCr1Zr samples. *Global Energy*. 2023;29(2):175–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JEST.29212>
17. Popovich A.A., Sufiarov V.S., Polozov I.A., Borisov E.V. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment. *Key Engineering Materials*. 2015;651–653:665–670.
18. Артемов А.Л., Дядченко В.Ю., Лукьяшко А.В., Новиков А.Н., Попович А.А., Рудской А.И., Свечкин В.П., Скоромнов В.И., Смоленцев А.А., Соколов Б.А., Солнцев В.Л., Суфияров В.Ш., Шачнев С.Ю. Обработка 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;1(16):50–62.
19. Artemov A.L., Dyadchenko V.Yu., Lukyashko A.V., Novikov A.N., Popovich A.A., Rudskoy A.I., Svechkin V.P., Skoromnov V.I., Smolentsev A.A., Sokolov B.A., Solntsev V.L., Sufiyarov V.Sh., Shachnev S.Yu. Development of design and technology solutions for additive manufacturing of prototype inner lining for combustion chamber of multifunctional liquid-propellant rocket engine. *Space Technique and Technologies*. 2017;1(16):50–62. (In Russ.).
20. Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А. Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета*. 2021;3:75–83.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>
21. Khlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabtsev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovsky Y.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A. Influence of the HIP technology on the structure and properties of nickel alloy VZH159. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021;3:75–83. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>
22. 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;11:1–11.
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-1-1>
23. Prager S.M., Solodova T.V., Tatarenko O.Y. Research of mechanical properties and microstructure of samples obtained by SLS from metal powder composition of VZh159 alloy. *Proceedings of VIAM*. 2017;11:1–11. (In Russ.).
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-11-1-1>
24. 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;113(1):1–9.
25. Ghorbanpour S., Alam M.E., Ferreri N.C., Kumar A., McWilliams B.A., Vogel S.C., Bicknell J., Beyerlein I.J., Knezevic M. Experimental characterization and crystal

plasticity modeling of anisotropy, tension-compression asymmetry, and texture evolution of additively manufactured Inconel 718 at room and elevated temperatures. *International Journal of Plasticity*. 2020;125:63–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.09.002>

22. Bai Y., Zhao C., Zhang Y., Chen J., Wang H. Additively manufactured CuCrZr alloy: Microstructure, mechanical properties and machinability. *Materials Science and Engineering: A*. 2021;819:141528. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141528>

Сведения об авторах



Арсений Вячеславович Репнин – инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ)

ORCID: 0009-0001-3157-3317

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

Евгений Владиславович Борисов – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» СПбПУ

ORCID: 0000-0003-2464-6706

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

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

ORCID: 0000-0002-5974-6654

E-mail: popovicha@mail.ru

Никита Александрович Голубков – ведущий инженер лаборатории «Синтез новых материалов и конструкций» СПбПУ

ORCID: 0009-0009-6785-1444

E-mail: golubkovna@gmail.com

Information about the Authors

Arseniy V. Repnin – Engineer, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)

ORCID: 0009-0001-3157-3317

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

Evgeny V. Borisov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, SPbPU

ORCID: 0000-0003-2464-6706

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

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

ORCID: 0000-0002-5974-6654

E-mail: popovicha@mail.ru

Nikita A. Golubkov – Lead Engineer, Laboratory “Synthesis of new materials and structures”, SPbPU

ORCID: 0009-0009-6785-1444

E-mail: golubkovna@gmail.com

Вклад авторов



А. В. Репнин – проведение экспериментов, обработка полученных результатов, написание черновика статьи.

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

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

Н. А. Голубков – проведение испытаний на растяжение и сжатие, обработка полученных результатов.

Contribution of the Authors

A. V. Repnin – conducted experiments, processed the results, and wrote the initial draft manuscript.

E. V. Borisov – planned experiments, wrote the manuscript, and participated in discussions about the results.

A. A. Popovich – conceptualized the idea, determined the purpose of the work, and participated in discussions about the results.

N. A. Golubkov – carried out tensile and compression tests, and processed the results obtained.

Статья поступила 27.06.2023 г.

Доработана 15.08.2023 г.

Принята к публикации 18.08.2023 г.

Received 27.06.2023

Revised 15.08.2023

Accepted 18.08.2023