

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30409>



А.М. Грачева  , И.А. Полозов,
А.В. Репнин, А.А. Попович

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

 gracheva.am@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ ДЛЯ ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЛП

Аннотация. Функционально-градиентные материалы (ФГМ) – это перспективные материалы, характеризующиеся постепенными переходами либо в составе, либо в микроструктуре, либо в плотности. Для расширения потенциала данных материалов можно использовать аддитивное производство при их изготовлении. Анализ существующих исследований ФГМ, полученных методом селективного лазерного плавления (СЛП), показывает, что слабо представлены исследования влияния изменения количества частиц на структуру и свойства. Исследования композитных ФГМ с большим количеством армирующих частиц, особенно с использованием оборудования с высоким подогревом, ограничены. Целью данной работы является проведение исследований композитных образцов ВЖ159 + WC, составы которых могут быть использованы для изготовления ФГМ методом СЛП. Для решения поставленной цели были проведены исследования дефектов, микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости в композитных образцах. Важным аспектом данной работы является исследование возможности получения ФГМ из металлов с большим содержанием армирующих частиц с использованием высокотемпературного подогрева методом СЛП. Было получено, что после изготовления композитных образцов методом СЛП в них видны нерастворенные частицы WC и поры в гранулах данного материала, отсутствуют другие дефекты. При увеличении содержания WC в композитных материалах происходит изменение микроструктуры – увеличение количества дендритов WC в матрице композита. В образцах ВЖ159 + 20% WC в матрице уже наблюдается некоторое количество W, который мог туда попасть из распавшихся гранул WC. Установлено, что при увеличении количества WC в композитных образцах микротвердость матрицы возрастает и достигает 1122,9 HV при 80% WC.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, композитные материалы, функционально-градиентные материалы, высокотемпературный подогрев, WC, ВЖ159.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30004 «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств», <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Для цитирования:

Грачева А.М., Полозов И.А., Репнин А.В., Попович А.А. Разработка и исследование составов для градиентных композитных материалов, полученных методом СЛП // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30409>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30409>

A.M. Gracheva  , I.A. Polozov,
A.V. Repnin, A.A. Popovich

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

 gracheva.am@mail.ru

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF COMPOSITIONS FOR GRADIENT COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY SLM

Abstract. Functionally graded materials (FGMs) are promising materials characterized by gradual transitions either in composition, or in microstructure, or in density. Additive manufacturing can be used to enhance the potential of these materials. An analysis of existing studies of FGMs obtained by selective laser melting (SLM) shows that the research on the effect of changing the number of particles on the structure and properties is poorly represented. Studies of composite FGMs with a large number of reinforcing particles, especially using high-heating equipment, are limited. The aim of this work is to study composite samples of VZh159 + WC, the compositions of which can be used to manufacture FGMs by SLM. To achieve this goal, defects, microstructure, chemical and phase compositions, as well as hardness in composite samples have been investigated. An important aspect of this work is to investigate the possibility of obtaining FGMs from metals with a high content of reinforcing particles using high-temperature heating by SLM method. It was found that after the manufacture of composite samples by SLM method, undissolved WC particles and pores in the granules of this material are visible in them, there are no other defects. When the WC content in the composite materials increases, there is a change in the microstructure – an increase in the number of WC dendrites in the composite matrix. In the samples of VZh159 + 20% WC in the matrix, a certain amount of W is observed, which could get there from the disintegrated WC granules. It was found that with the increase in the amount of WC in composite samples, the microhardness of the matrix increases and reaches 1122.9 HV at 80% WC.

Keywords: selective laser melting, composite materials, functionally graded materials, high-temperature heating, WC, VZh159.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

Citation:

Gracheva A.M., Polozov I.A., Repnin A.V., Popovich A.A., Development and investigation of compositions for gradient composite materials obtained by SLM, *Global Energy*, 30 (04) (2024) 106–118, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30409>

Введение. Композитные материалы — это материалы, состоящие из двух или более компонентов, которые объединили в целях повышения уже имеющихся свойств и достижения тех свойств, которые невозможны для каждого компонента в отдельности [1]. Их ключевой компонент — матрица, которая удерживает армирующее вещество, повышая такие характеристики, как прочность, устойчивость к износу, жесткость и др. [2]. Так, существует классификация композитных материалов по типу матрицы, например, таких как металломатричные композиты, где матрицей является металл, полимерные композиты, где матрицей является полимер, и керамические композиты, где матрицей является керамика [3]. У композитных материалов выделяют ряд преимуществ: повышенную прочность и жесткость, улучшенные характеристики по износу и усталости,

более низкий вес по сравнению с традиционными материалами, возможность создания материалов с уникальными свойствами, расширенные возможности подбора композиций материалов и т.д. [4–6]. Необходимо отметить, что использование традиционных технологий получения композитов имеет определенные ограничения по распределению армирующего материала [7]. Однако применение новых производственных технологий, например аддитивного производства, позволяет устранить данные ограничения [8]. Благодаря этому появляется возможность создания композитов с градиентным распределением армирующего материала [9].

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) — это перспективные материалы, характеризующиеся постепенными переходами либо в составе, либо в получаемых микроструктурах (например, размере зерна, текстуре и т.д.), либо в плотности (ячеистые структуры, контролируемая пористость и т.д.) [10]. Эта особенность позволяет им постепенно изменять свойства изделия, что делает их идеальными для повышения производительности [11]. Существующие методы создания ФГМ хоть и эффективны, имеют ряд ограничений. Аддитивное производство (АП) предлагает новый подход, который позволяет преодолеть эти ограничения благодаря своей способности создавать сложные структуры с высокой точностью [12]. Суть АП заключается в послойном изготовлении изделий, что позволяет изготавливать ФГМ с многомерными и направленными градиентными структурами [13].

АП включает в себя следующие виды: струйное нанесение связующего, прямой подвод энергии и материала, экструзию материала, струйное нанесение материала, синтез на подложке, листовую ламинацию, фотополимеризацию в ванне [14]. Практически все виды АП можно использовать для изготовления ФГМ. Для изготовления ФГМ из металлов и сплавов существуют два основных технологических процесса АП: прямой подвод энергии и материала (технология прямого лазерного выращивания, ПЛВ) и синтез на подложке (технология селективного лазерного плавления, СЛП). Применение вышеперечисленных методов может быть использовано для формирования не только простых ФГМ, но и ФГМ с постепенным (градиентным) изменением количества армирующих частиц в металлической матрице [15].

Проведение разработок и исследований в области металлических композитных материалов с армирующими частицами, изготовленными методом СЛП, является активно развивающимся направлением [16–18]. Основные исследования фокусируются на оптимизации параметров СЛП для получения композитов с заданными свойствами. Особое внимание уделяется контролю концентрации армирующих частиц, морфологии и распределения частиц, а также микроструктуры материала [19]. Использование высокотемпературного подогрева в процессе СЛП позволяет существенно улучшить механические свойства получаемых композитов [20]. Высокая температура способствует улучшению растекания расплавленного металла, формированию более однородной микроструктуры и уменьшению остаточных напряжений, что положительно сказывается на прочности и износостойкости композитов. Высокотемпературный подогрев также может способствовать активации процессов диффузии и рекристаллизации в зоне плавления, что приводит к улучшению свойства поверхности и созданию более однородного перехода между слоями с разным составом.

Н. Zhang и др. в своей работе исследовали композит Inconel 718, армированный субмикронными частицами WC, который был изготовлен методом СЛП [21]. Образцы были исследованы с точки зрения качества изготовления, эволюции микроструктуры, свойств при растяжении и ползучести. Результаты показали, что снижение плотности энергии параметров СЛП процесса приводит к изготовлению композитов с более низкой плотностью из-за образования большего количества пор и трещин. Микроструктура изготовленных композитов в основном состояла из двух различных типов, а именно ячеистых и столбчатых дендритов, которые формировались в ванне расплава. Z. Li и др. в своем исследовании изучали композит, полученный методом СЛП, где матрицей была сталь 18Ni300, а в качестве армирующих частиц использовался WC [19]. Были

проанализированы микроструктуры и свойства композитов при растяжении. Результаты показывают, что добавление WC значительно влияет на микроструктуру и свойства 18Ni300. При добавлении WC появляются аустенитная (γ -Fe) фаза и WC1-X, а также изменяются морфология и ориентация зерен. Кроме того, образуется явный межфазный слой (около 1 мкм в толщину) из-за частичного растворения частиц WC и диффузии W и C. При увеличении доли WC доля α -Fe в матрице уменьшается, а доли γ -Fe, W_2C и WC_{1-x} увеличиваются. Сферические порошки WC разбиваются на множество мелких порошков, которые распределяются в матрице. Макротрещины образуются при содержании WC более 25%. S. Fries и др. в своей работе исследовали композит с содержанием WC 17 мас. %, где матрицей был Co, а образцы изготавливались методом СЛП [20]. После изготовления была проанализирована микроструктура, плотность и твердость. Кроме того, для определения фазового состава был проведен рентгеноструктурный анализ. Главной особенностью работы было то, что при изготовлении композитных образцов использовался высокотемпературный подогрев рабочей платформы, что и позволило получить бездефектные образцы.

Анализ существующих исследований ФГМ из металлов с армирующими частицами, полученных методом СЛП, показывает, что слабо представлены исследования влияния изменения количества частиц на структуру и свойства. Большинство работ сосредоточено на материалах с небольшим содержанием армирующих частиц и без градиентных изменений. Исследования композитных ФГМ с большим количеством армирующих частиц, особенно с использованием оборудования с высоким подогревом, ограничены. Важным аспектом данной работы является исследование возможности получения ФГМ из металлов с большим содержанием армирующих частиц с использованием высокотемпературного подогрева методом СЛП. В связи с этим целью данной работы является проведение исследований композитных образцов ВЖ159 + WC, составы которых могут быть использованы для изготовления ФГМ. Для решения поставленной цели были проведены исследования дефектов, микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости в композитных образцах.

Материалы и методы

Для данной работы были разработаны три варианта порошковой смеси, которые содержали 20, 60 и 80 мас. % WC, остальная часть – ВЖ159. Подготовка порошковых композиций производилась в гравитационном смесителе в течение восьми часов. На рис. 1 представлены снимки методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) трех вариантов порошковых смесей. На рисунке обозначены порошки: порошок сплава ВЖ159 имеет сферическую форму, характерную методу газового распыления, и однородный размер частиц, соответствующий диапазону 10–63 мкм. Порошок WC является менее однородным, имеющим неоднородную структуру, состоящую из гранул размером 10–40 мкм.

В табл. 1 представлен химический состав сплава ВЖ159, в качестве основы сплава выступает никель, количество примесей в сплаве менее 4%. Используемый в данной работе WC содержит 6,1% (масс.) углерода, оставшаяся часть – вольфрам.

В данной работе использована установка СЛП AconityMIDI, которая расположена в лаборатории «Конструкционные и функциональные материалы». Максимальная мощность лазера данной установки составляет 1000 Вт, при этом установка имеет техническую возможность предварительного высокотемпературного подогрева. В процессе работы рабочая камера установки непрерывно заполнялась инертным газом (аргоном) высокой чистоты. После построения изделий образцы, расположенные на подложке, охлаждались до комнатной температуры со скоростью около 5°C в минуту.

На данном этапе исследований не осуществлялось изготовление ФГМ как единого образца, а анализировалась группа композитных образцов, составы которых соответствуют областям ФГМ. Главной особенностью проводимых исследований было наличие высокотемпературного

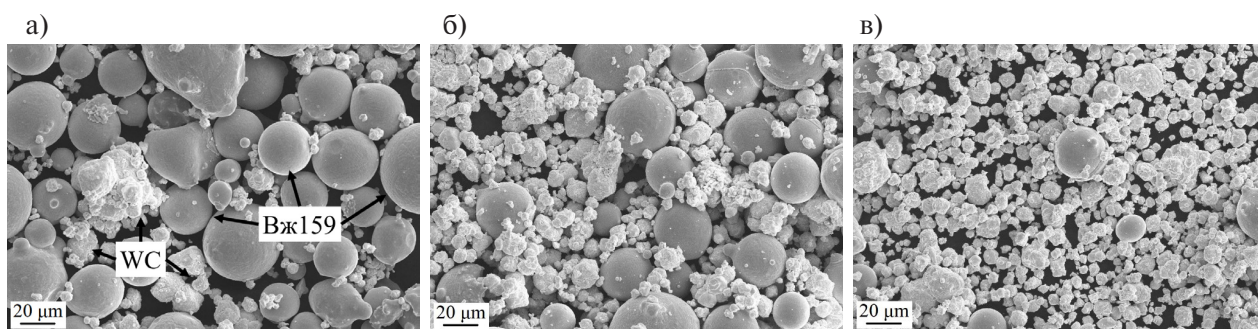


Рис. 1. Смеси металлических порошков для изготовления композитного материала методом СЛП: а) порошковая смесь ВЖ159 + 20% WC, б) порошковая смесь ВЖ159 + 60% WC, в) порошковая смесь ВЖ159 + 80% WC

Fig. 1. Mixtures of metal powders for the manufacture of a composite material by SLM:

a) powder mixture VZh159 + 20% WC, b) powder mixture VZh159 + 60% WC, c) powder mixture VZh159 + 80% WC

подогрева платформы построения при изготовлении композитных образцов. Нагрев платформы при изготовлении всех образцов соответствовал 800°C. Наличие высокотемпературного нагрева позволяет снизить температурный градиент, что снижает вероятность образования дефектов. Так как возможности установки позволяют осуществлять нагрев до 1200°C, то в будущих работах возможно рассмотрение изготовления ФГМ с большим содержанием армирующих частиц. Для изготовления композитных образцов были выбраны следующие параметры: мощность лазера 275 Вт, скорость сканирования 760 мм/с, расстояние между проходами лазера 100 мкм, толщина слоя 50 мкм.

Таблица 1

Химический состав сплава ВЖ159

Table 1

Chemical composition of the VZh159 alloy

Сплав	Cr, %	Ni, %	Al, %	Mo, %	Nb, %	Cu, %	Zr, %	Fe, %	Si, %	Mn, %
								Не более		
ВЖ159	26–28	Осн.	1,25–1,55	7–7,8	2,7–3,4	—	—	3	0,8	0,5

Для изучения дефектов полученных композиционных образцов использовался оптический микроскоп Leica DMI8 M (Leica Microsystems, Германия). В данной работе для изучения химического состава и микроструктуры применялся сканирующий электронный микроскоп Mira 3 (TESCAN, Чехия) с модулем энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Анализ фазового состава проводился на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab (Rigaku Corporation, Япония). Микротвердость исследовалась на микротвердомере по Викерсу MicroMet 5101 (Buehler Ltd, США).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены снимки с оптического микроскопа полученных образцов. Отчетливо видны нерастворенные частицы WC и поры в гранулах данного материала. Отмечено отсутствие иных дефектов, что свидетельствует о том, что выбранный режим СЛП является подходящим для бездефектного изготовления композитных материалов с различной концентрацией армирующих частиц WC (с учетом наличия высокотемпературного подогрева при печати). Также стоит отметить, что не происходит существенного увеличения количества крупных гранул WC при переходе

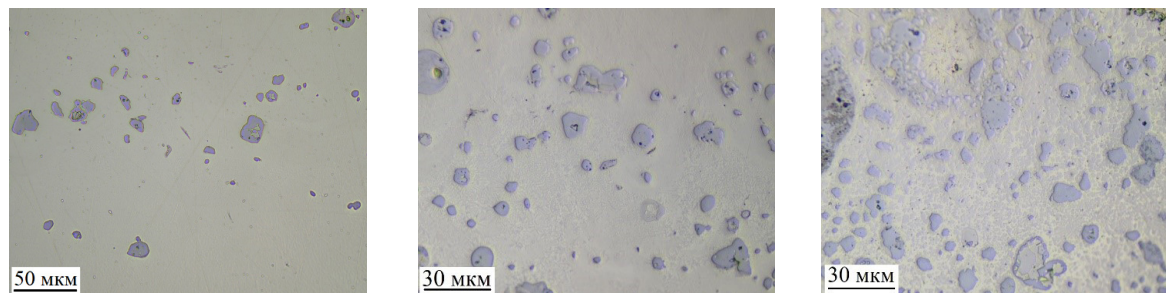


Рис. 2. Результаты исследования дефектов композитных образцов: а) композитный образец ВЖ159 + 20% WC, б) композитный образец ВЖ159 + 60% WC, в) композитный образец ВЖ159 + 80% WC

Fig. 2. Results of the defects investigation in composite samples: a) composite sample VZh159 + 20% WC, b) composite sample VZh159 + 60% WC, c) composite sample VZh159 + 80% WC

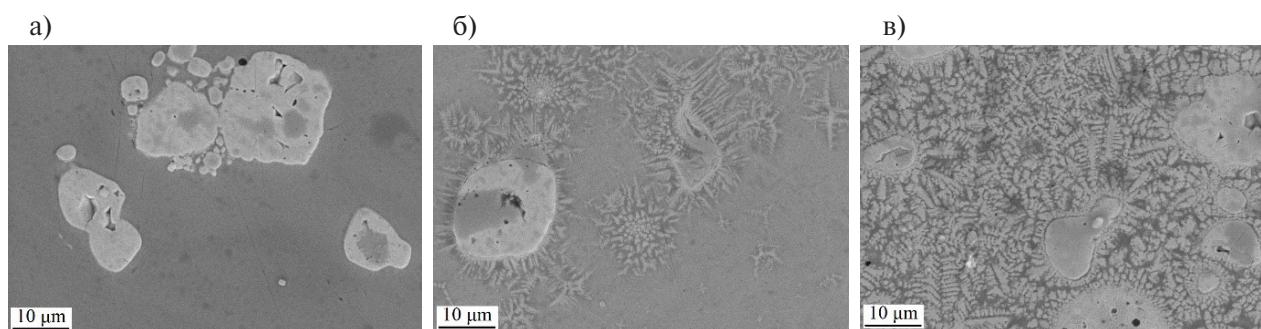


Рис. 3. Результаты исследования микроструктуры композитных образцов: а) композитный образец ВЖ159 + 20% WC, б) композитный образец ВЖ159 + 60% WC, в) композитный образец ВЖ159 + 80% WC

Fig. 3. Results of the microstructural investigation in composite samples: a) composite sample VZh159 + 20% WC, b) composite sample VZh159 + 60% WC, c) composite sample VZh159 + 80% WC

от ВЖ159 + 60% WC к ВЖ159 + 80% WC. Можно предположить, что гранулы распадаются на мелкие частицы и попадают в матрицу, частично растворяясь в ней.

На рис. 3 представлена микроструктура композитных материалов с различным соотношением составляющих. Так, на рис. 3а в образце с 20% WC наблюдается отсутствие выраженной структуры. На рис. 3б происходит образование дендритов вблизи зерен WC (образец с составом ВЖ159 + 60% WC). А на рис. 3в WC выступает в роли матрицы композита и образует дендритную структуру (80% WC). Подобного рода поведение композита соответствуют рассуждениям о полученных при анализе дефектов, о чем говорилось выше. Крупные гранулы WC распадаются на мелкие частицы, и затем не растворившаяся часть W в матрице ВЖ159 выделяется в виде дендритов.

На рис. 4 представлено химическое распределение никеля и вольфрама в полученных образцах. Так, на рис. 4а видно скопление W в частицах WC и его отсутствие в остальных частях образца, что свидетельствует о том, что в матрице содержится минимальное количество W. Повышение количества WC (рис. 4б) приводит к возникновению дендритных областей вблизи крупных гранул WC. Кроме того, наличие W начинает проследиваться в матрице композита. Исследование образца с наибольшей концентрацией WC выявило следующие особенности: никель преимущественно локализован в межчастичных пространствах WC, а на границе раздела между матрицей и армирующим элементом наблюдаются дендриты, имеющие химический состав, соответствующий WC. Таким образом в виде матрицы уже начинает выступать WC, а не ВЖ159.

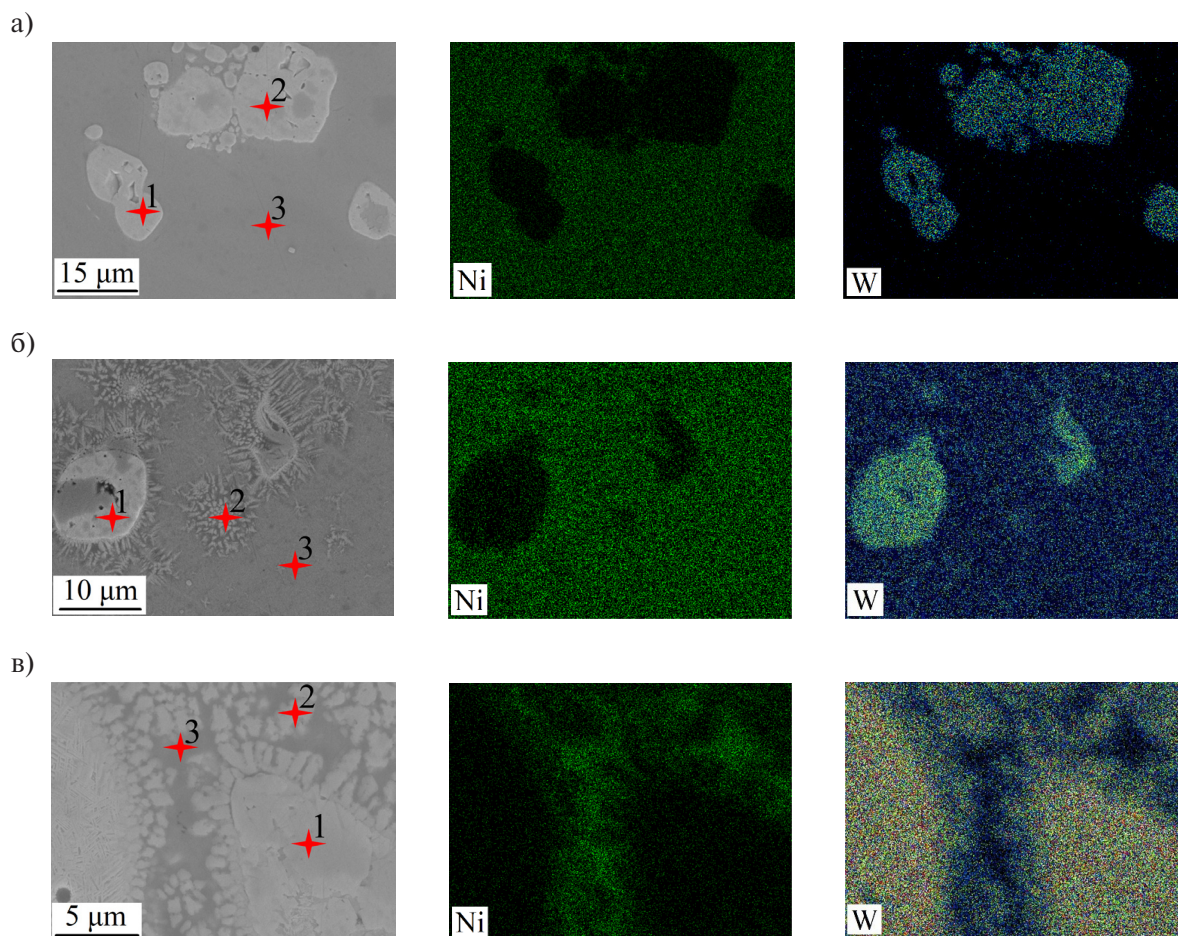


Рис. 4. Результаты исследования химического состава композитных образцов: а) композитный образец ВЖ159 + 20% WC, б) композитный образец ВЖ159 + 60% WC, в) композитный образец ВЖ159 + 80% WC
Fig. 4. Results of a chemical composition analysis in composite samples: a) composite sample VZh159 + 20% WC, б) composite sample VZh159 + 60% WC, в) composite sample VZh159 + 80% WC

В табл. 2 представлены результаты исследования химического состава полученных образцов по точкам, указанным на рис. 4. Так, в случае образца с содержанием 20% WC первые две точки не имеют в своем составе Ni и Cr, что свидетельствует о том, что это чистый WC.

В композитном материале с 60% WC второй точкой была выбрана дендритная структура, где происходит определение всех элементов, что может свидетельствовать о частичном смешении материалов. В случае, когда WC выступает в роли матрицы, происходит аналогичное второму образцу частичное растворение элементов. Предельная растворимость W в Ni составляет около 12 ат. %. В сплаве ВЖ159 не присутствует W, однако даже в образцах ВЖ159 + 20% WC в матрице уже наблюдается некоторое количество W, который мог туда попасть из распавшихся гранул WC.

Исследования фазового состава проводились только для композитного образца ВЖ159 + 80% WC, так как для более низкого содержания WC исследования уже проводились ранее [19]. Так, было установлено, что в системе W-Ni существуют три промежуточные фазы: $Ni_4W(\beta)$, $NiW(\delta)$ и $NiW_2(\gamma)$, а также твердые растворы на основе Ni и W. Растворимость W в (Ni) составляет 17,5 ат. % при эвтектической температуре, 16,3 ат. % при перитектоидной температуре 970°C и далее снижается до 11,8 ат. % при 500°C. В системе W-C установлено образование трех соединений: $W_2C(\beta)$, γWC_{1-x} и WC. Растворимость C в W составляет 0,7 ат. %. Соединение W_2C плавится конгруэнтно при 2785°C и 30 ат. %. Область гомогенности фазы W_2C соответствует 26–34 ат. % C при

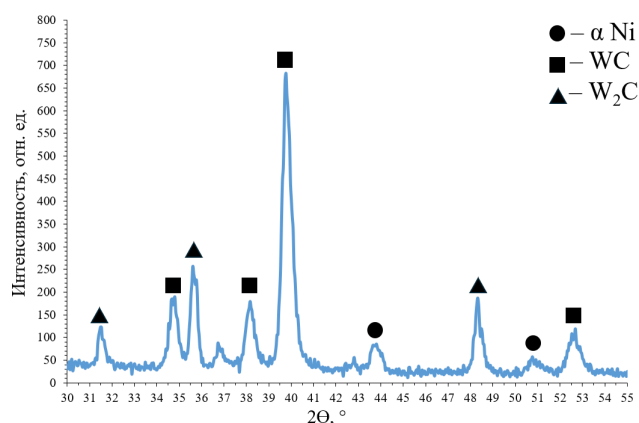


Рис. 5. Результаты исследования фазового состава композитного образца ВЖ159 + 80% WC

Fig. 5. Results of phase composition analysis of VZh159 composite sample containing 80% WC

температурах 2710–2740°C и примерно 30–35 ат. % С при температурах ниже 2200°C. Полиморфный переход $\beta W_2C \leftrightarrow \beta' W_2C$ осуществляется при температурах ниже 2490±30°C для сплава с 32,6 ат. % С и 2380±30°C для сплава с 33,4 ат. % С. Соединение βW_2C распадается по эвтектидной реакции при температуре 2384°C на $\beta' W_2C$ и WC. Фаза WC кристаллизуется при температуре 2785±5°C по перитектической реакции в узком концентрационном интервале не более 1% (ат.).

Таблица 2

Результаты исследования химического состава композитных образцов (основные элементы)

Table 2

Chemical composition analysis of composite samples (major elements)

Композитный образец	№ цифры с рис. 3	Ni, мас. %	Cr, мас. %	W, мас. %	C, мас. %
ВЖ159 + 20 % WC	1	—	—	87,69	12,31
	2	—	—	89,06	10,94
	3	56,3	26,23	7,08	—
ВЖ159 + 60 % WC	1	—	—	88,03	11,97
	2	20,64	13,37	49,17	11,59
	3	40,68	17,77	36,47	—
ВЖ159 + 80 % WC	1	—	—	85,77	14,23
	2	10,15	11,08	60,35	18,42
	3	66,04	9,94	24,02	—

На рис. 5 представлены результаты исследования фазового состава. Видно, что присутствует никель, который является основным элементом сплава ВЖ159, также присутствует WC, который был одним из компонентов подготовленных смесей, и, кроме того, в композитном образце присутствует соединение W_2C . Наличие данного соединения можно объяснить тем, что в процессе СЛП происходит расплавление частиц WC, и за счет диффузии происходит перераспределение химических элементов, которое приводит к образованию соединения W_2C .

В исследованиях микротвердости рассматривались матричные зоны композитных образцов: чистая матрица для образца ВЖ159 + 20% WC, матрица вблизи формирования дендритов для

ВЖ159 + 60% WC и зона ВЖ159 для образца и ВЖ159 + 80% WC. Полученные значения микротвердости представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что наибольшее значение микротвердости выявлено у образца с составом ВЖ159 + 80% WC, а наименьшее значение — у образца с минимальным содержанием WC. То есть при увеличении количества WC помимо упрочнения композитных образцов за счет наличия армирующего материала происходит упрочнение матрицы за счет растворения в ней частиц WC. Это может привести к повышению прочностных характеристик. Однако WC является хрупким материалом. С увеличением его содержания в сплаве пластичность материала снижается. Это значит, что сплав с большим содержанием WC будет более склонен к разрушению при нагрузке, чем сплав с меньшим содержанием WC. Необходимо проведение дополнительных исследований (механический испытаний) для более четкого понимания влияния вышеописанного эффекта.

Таблица 3

Результаты исследования микротвердости композитных образцов

Table 3

Microhardness testing results of composite samples

Композитный образец	Рассматриваемая область	Значение микротвердости, HV
ВЖ159 + 20% WC	Чистая матрица ВЖ159	423,5
ВЖ159 + 60% WC	Матрица ВЖ159 вблизи формирования дендритов	877,3
ВЖ159 + 80% WC	Матрица WC с дендритами	1122,9

Выводы

В данной статье были проведены исследования дефектов, микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости в композитных образцах ВЖ159 + WC, составы которых могут быть использованы для изготовления ФГМ. На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. После изготовления композитных образцов методом СЛП в них видны нерастворенные частицы WC и поры в гранулах данного материала, отсутствуют другие дефекты.
2. При увеличении содержания WC в композитных материалах происходит изменение микроструктуры — увеличение количества дендритов WC в матрице композита. В образцах ВЖ159 + 20 % WC в матрице уже наблюдается некоторое количество W, который мог туда попасть из распавшихся гранул WC.
3. Установлено, что при увеличении количества WC в композитных образцах микротвердость матрицы возрастает и достигает 1122,9 HV при 80% WC.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Bhong M., Khan T.K.H., Devade K., Krishna B.V., Sura S., Eftikhaar H.K., Thethi H.P., Gupta N. Review of composite materials and applications, Materials Today: Proceedings, (2023) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>
- [2] Egbo M.K. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, Journal of King Saud University — Engineering Sciences, 33(8) (2021) 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- [3] Bahl S. Fiber reinforced metal matrix composites — a review, Materials Today: Proceedings, 39(1) (2021) 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>

- [4] **Minasyan T., Hussainova I.** Laser Powder-Bed Fusion of Ceramic Particulate Reinforced Aluminum Alloys: A Review, *Materials*, 15(7) (2022) 2467. <https://doi.org/10.3390/ma15072467>
- [5] **Raju A., Shanmugaraja M.** Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review, *Materials Today: Proceedings*, 46(19) (2021) 9291–9296. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.141>
- [6] **Swolfs Y., Verpoest I., Gorbatiikh L.** Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications, *International Materials Reviews*, 64(4) (2019) 181–215. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1467365>
- [7] **Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H.** Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies, *Journal of Materials Research and Technology*, 13 (2021) 1628–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
- [8] **Ren L., Wang Z., Ren L., Han Z., Liu Q., Song Z.** Graded biological materials and additive manufacturing technologies for producing bioinspired graded materials: An overview, *Composites Part B: Engineering*, 242 (2022) 110086. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110086>
- [9] **Li Y., Feng Z., Hao L., Huang L., Xin C., Wang Y., Bilotti E., Essa K., Zhang H., Li Z., Yan F., Peijs T.** A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties, *Advanced Materials Technologies*, 5(6) (2020) 1900981. <https://doi.org/10.1002/admt.201900981>
- [10] **Reichardt A., Shapiro A.A., Otis R., Dillon R.P., Borgonia J.P., McEnerney B.W., Hosemann P., Beese A.M.** Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials, *International Materials Reviews*, 66(1) (2021) 1–29. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1709354>
- [11] **Ansari M., Jabari E., Toyserkani E.** Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 294 (2021) 117117. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117117>
- [12] **Yan L., Chen Y., Liou F.** Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100901. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100901>
- [13] **Zhang C., Chen F., Huang Z., Jia M., Chen G., Ye Y., Lin Y., Liu W., Chen B., Shen Q., Zhang L., Lavernia E.J.** Additive manufacturing of functionally graded materials: A review, *Materials Science and Engineering A*, 764 (2019) 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>
- [14] **Liu G., Zhang X., Chen X., He Y., Cheng L., Huo M., Yin J., Hao F., Chen S., Wang P., Yi S., Wan L., Mao Z., Chen Z., Wang X., Cao Z., Lu J.** Additive manufacturing of structural materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145 (2021) 100596. <https://doi.org/10.1016/j.msre.2020.100596>
- [15] **Ma Z., Liu W., Li W., Liu H., Song J., Liu Y., Huang Y., Xia Y., Wang Z., Liu B., Lv Z., Hu G., Wang T., Li T., Liu S., Zhang Y.** Additive manufacturing of functional gradient materials: A review of research progress and challenges, *Journal of Alloys and Compounds*, 971 (2024) 172642. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172642>
- [16] **Fomin V.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Filippov A.A.** Creation of a functionally gradient material by the selective laser melting method, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 61(5) (2020) 878–887. <https://doi.org/10.1134/S0021894420050235>
- [17] **Chen C., Huang B., Liu Z., Li Y., Zou D., Liu T., Chang Y., Chen L.** Additive manufacturing of WC–Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, 63 (2023) 103410. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103410>
- [18] **Kang N., Ma W., Heraud L., El Mansori M., Li F., Liu M., Liao H.** Selective laser melting of tungsten carbide reinforced maraging steel composite, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.031>
- [19] **Li Z., Teng B., Yao B., Liu J.** Microstructure and mechanical properties of WC reinforced 18Ni300 composites produced by selective laser melting, *Materials Characterization*, 180 (2021) 111406. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111406>

[20] Fries S., Genilke S., Wilms M.B., Seimann M., Weisheit A., Kaletsch A., Bergs T., Schleifenbaum J.H., Broeckmann C. Laser-Based Additive Manufacturing of WC–Co with High-Temperature Powder Bed Preheating, *Steel Research International*, 91(3) (2020) 1900511. <https://doi.org/10.1002/srin.201900511>

[21] Zhang H., Gu D., Ma C., Guo M., Yang J., Zhang H., Chen H., Li C., Svyarenko K., Kosiba K. Understanding tensile and creep properties of WC reinforced nickel-based composites fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 802 (2021) 140431. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140431>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРАЧЕВА Анна Максимовна — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

ПОЛОЗОВ Игорь Анатольевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: igor.pozlov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

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>

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

REFERENCES

[1] M. Bhong, T.K.H. Khan, K. Devade, B.V. Krishna, S. Sura, H.K. Eftikhaar, H.P. Thethi, N. Gupta, Review of composite materials and applications, *Materials Today: Proceedings*, (2023) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>

[2] M.K. Egbo, A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 33(8) (2021) 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>

[3] S. Bahl, Fiber reinforced metal matrix composites – a review, *Materials Today: Proceedings*, 39(1) (2021) 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.423>

[4] T. Minasyan, I. Hussainova, Laser Powder-Bed Fusion of Ceramic Particulate Reinforced Aluminum Alloys: A Review, *Materials*, 15(7) (2022) 2467. <https://doi.org/10.3390/ma15072467>

[5] A. Raju, M. Shanmugaraja, Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review, *Materials Today: Proceedings*, 46(19) (2021) 9291–9296. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.141>

[6] Y. Swolfs, I. Verpoest, L. Gorbatikh, Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications, *International Materials Reviews*, 64(4) (2019) 181–215. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1467365>

[7] R. Ghanavati, H. Naffakh-Moosavy, Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies, *Journal of Materials Research and Technology*, 13 (2021) 1628–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>

- [8] **L. Ren, Z. Wang, L. Ren, Z. Han, Q. Liu, Z. Song**, Graded biological materials and additive manufacturing technologies for producing bioinspired graded materials: An overview, *Composites Part B: Engineering*, 242 (2022) 110086. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110086>
- [9] **Y. Li, Z. Feng, L. Hao, L. Huang, C. Xin, Y. Wang, E. Bilotti, K. Essa, H. Zhang, Z. Li, F. Yan, T. Peijs**, A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties, *Advanced Materials Technologies*, 5(6) (2020) 1900981. <https://doi.org/10.1002/admt.201900981>
- [10] **A. Reichardt, A.A. Shapiro, R. Otis, R.P. Dillon, J.P. Borgonia, B.W. McEnerney, P. Hosemann, A.M. Beese**, Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials, *International Materials Reviews*, 66(1) (2021) 1–29. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1709354>
- [11] **M. Ansari, E. Jabari, E. Toyserkani**, Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 294 (2021) 117117. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117117>
- [12] **L. Yan, Y. Chen, F. Liou**, Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100901. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100901>
- [13] **C. Zhang, F. Chen, Z. Huang, M. Jia, G. Chen, Y. Ye, Y. Lin, W. Liu, B. Chen, Q. Shen, L. Zhang, E.J. Lavernia**, Additive manufacturing of functionally graded materials: A review, *Materials Science and Engineering A*, 764 (2019) 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>
- [14] **G. Liu, X. Zhang, X. Chen, Y. He, L. Cheng, M. Huo, J. Yin, F. Hao, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu**, Additive manufacturing of structural materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145 (2021) 100596. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596>
- [15] **Z. Ma, W. Liu, W. Li, H. Liu, J. Song, Y. Liu, Y. Huang, Y. Xia, Z. Wang, B. Liu, Z. Lv, G. Hu, T. Wang, T. Li, S. Liu, Y. Zhang**, Additive manufacturing of functional gradient materials: A review of research progress and challenges, *Journal of Alloys and Compounds*, 971 (2024) 172642. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172642>
- [16] **V.M. Fomin, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, A.A. Filippov**, Creation of a functionally gradient material by the selective laser melting method, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 61(5) (2020) 878–887. <https://doi.org/10.1134/S0021894420050235>
- [17] **C. Chen, B. Huang, Z. Liu, Y. Li, D. Zou, T. Liu, Y. Chang, L. Chen**, Additive manufacturing of WC–Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, 63 (2023) 103410. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103410>
- [18] **N. Kang, W. Ma, L. Heraud, M. El Mansori, F. Li, M. Liu, H. Liao**, Selective laser melting of tungsten carbide reinforced maraging steel composite, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.031>
- [19] **Z. Li, B. Teng, B. Yao, J. Liu**, Microstructure and mechanical properties of WC reinforced 18Ni300 composites produced by selective laser melting, *Materials Characterization*, 180 (2021) 111406. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111406>
- [20] **S. Fries, S. Genilke, M.B. Wilms, M. Seimann, A. Weisheit, A. Kaletsch, T. Bergs, J.H. Schleifenbaum, C. Broeckmann**, Laser-Based Additive Manufacturing of WC–Co with High-Temperature Powder Bed Preheating, *Steel Research International*, 91(3) (2020) 1900511. <https://doi.org/10.1002/srin.201900511>
- [21] **H. Zhang, D. Gu, C. Ma, M. Guo, J. Yang, H. Zhang, H. Chen, C. Li, K. Svyarenko, K. Kosiba**, Understanding tensile and creep properties of WC reinforced nickel-based composites fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 802 (2021) 140431. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140431>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna M. GRACHEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: gracheva.am@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2567-3332>

Igor A. POLOZOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: igor.polozov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

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

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

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

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Поступила: 10.09.2024; Одобрена: 13.10.2024; Принята: 23.10.2024.

Submitted: 10.09.2024; Approved: 13.10.2024; Accepted: 23.10.2024.