УДК 621.762:621.793

Покрyтия, сформированные высокоскоростным селективным лазерным спеканием механосплавленных в жидком углеводороде порошков Nb-Cu: фазовый состав и свойства

М. А. Еремина¹, С. Ф. Ломаева¹, Е. В. Харанжевский², В. В. Тарасов¹

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

Аннотация. В работе исследованы фазовый состав, микроструктура, твердость и износостойкость покрытий толщиной до 10 мкм, сформированных методом высокоскоростного селективного лазерного спекания на железной подложке из механически сплавленных в петролейном эфире порошков ниобия и меди. Фазовый состав покрытий – Nb₂C, NbC_{0.75}, (Fe,Nb)₆C, твердые растворы Nb в Cu и Fe. Твердость покрытий на отдельных участках составляет от 7 до 11 ГПа. Покрyтия практически не изнашиваются при трибологических испытаниях с шариками из стали и сплава WC-Co, коэффициент трения не превышает 0.9 в паре со стальным контртелом и 0.7 – в паре с контртелом из сплава WC-Co.

Ключевые слова: карбиды ниобия, медь, покрyтия, механическое сплавление, лазерное спекание, твердость, износостойкость.

✉ Марина Еремина, e-mail: mrere@mail.ru

Coatings Produced by Short Pulse Selective Laser Sintering of Nb-Cu Powders Mechanically Alloyed in Liquid Hydrocarbon: Phase Composition and Properties

Marina A. Eryomina¹, Svetlana F. Lomayeva¹, Evgeniy V. Kharanzhevskii², Valery V. Tarasov¹

¹ Udmurt Federal Research Center UB RAS (T. Baramzina Str., 34, Izhevsk, 426067, Russian Federation)

² Udmurt State University (Universitetskaya Str., 1, Izhevsk, 426034, Izhevsk, Russian Federation)

Summary. The paper studies the phase composition, microstructure, hardness and wear resistance of NbC-Cu coatings on the iron substrate. NbC-Cu based composites are used as wear-resistant materials with high strength and thermal properties. Poor wettability of carbides by molten copper hinders obtaining these composites by casting, making mechanical alloying the most efficient way to synthesize NbC-Cu composites. In this work, the NbC-Cu powder composites were obtained by mechanical alloying of niobium (87 wt.%) and copper (13 wt.%) powders in petroleum ether in the Fritsch P-7 planetary ball mill for 7 h. Coatings were produced by short pulse selective laser sintering of the alloyed powders. SEM analysis does not show any cracks, large pores or dividing by layers on the boundaries between the coating and the substrate. XRD studies show that coatings consist of phases NbC_{0.75} (38 vol.%), Nb₂C (13 vol.%), (Fe,Nb)₆C (12 vol.%), Nb solid solutions in Cu (11 vol.%) and Fe (26 vol.%). (Fe,Nb)₆C phase appears due to contamination with iron during milling. The microstructure of coatings is shown to consist of zones of two types, including Nb and Cu enriched and Fe enriched. The first one contains a greater number of carbide phases, and the hardness of these zones being ~11 GPa. The zones of second type have hardness of ~7 GPa. Tribological tests conducted on polished coatings 5-10 μm in thickness show their excellent wear resistance when testing with steel and WC-Co balls. The friction coefficients initially equal to 0.25 do not exceed 0.9 by the end of the tests with a steel counter-body and 0.7 for the tests with a WC-Co counter-body. The mechanical alloying in liquid hydrocarbon media has been shown to be an effective method to synthesize NbC-Cu composites for wear-resistant coatings.

Keywords: niobium carbides, copper, coatings, mechanical alloying, laser sintering, hardness, wear resistance.

✉ Marina Eryomina, e-mail: mrere@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Карбид ниобия и композиты на его основе обладают высокой твердостью (до 55 ГПа [1]), а при введении его в медную матрицу используется как износостойкий материал с высокими прочностными и термическими характеристиками [2 – 5]. Медь практически не растворяется в ниобии и карбиде ниобия, не растворяет углерод, у нее относительно невысокая температура плавления, однако литьем композиты Cu-NbC получить достаточно сложно из-за плохой смачиваемости карбида расплавом меди.

Эффективным способом получения карбидов ниобия в медной связке является механическое сплавление порошков ниобия, меди и графита (сажи), например, [5], или механическое сплавление порошков ниобия и меди в жидких органических средах [6]. В последнем случае порошки получают более дисперсными, что позволяет формировать достаточно тонкие покрытия.

Метод лазерной наплавки порошков зарекомендовал себя как быстрый и результативный способ получения плотных слоев, прочно связанных с подложкой. Он широко используется для формирования покрытий из карбидов титана, ниобия, вольфрама, циркония и др. [7 – 10].

Данная работа является продолжением серии исследований по созданию покрытий из порошков, полученных механосплавлением в углеводородах.

Целью работы было изучение фазового состава, микроструктуры и свойств (твердости, износостойкости) покрытий, сформированных высокоскоростным селективным лазерным спеканием механически сплавленных в жидком углеводороде порошков Nb и Cu.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Порошки ниобия (99.6 мас.%, ~50 мкм) и меди (99.7 мас.%, ~18 мкм) были механически сплавлены в петролейном эфире в течение 7 ч в шаровой планетарной мельнице Fritsch P-7. Использованы контейнеры и шары из закаленной стали (C – 1, Cr – 1.5 мас.%). Массовое соотношение Nb:Cu = 87:13, в атомных процентах такой состав близок Nb₈₃Cu₁₇. Полученные порошки наносили на поверхность пластин из железа Армко, разравнивали валиком и подвергали высокоскоростному селективному лазерному спеканию с помощью Nd:YAG лазера ($\lambda = 1.065$ мкм, мощность 50 Вт, частота 100 кГц, длительность импульса 100 мкс). Покрытия наносили в атмосфере аргона [11, 12]. Скорость сканирования поверхности – 100 мм/с, величина пятна лазерного пучка в фокусе – 30 мкм.

Фазовый состав порошка и покрытий анализировали на дифрактометре MiniFlex (Rigaku Corp.) в излучении Co K α в интервале углов от 10° до 140°. Исследование микроструктуры покрытий проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Thermo Fisher Scientific (FEI) Quattro S с приставкой для энергодисперсионного анализа. Перед исследованиями покрытия шлифовали и полировали. Измерение твердости выполнено с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0.49 N, ошибка измерения определена по 10 результатам индентирования.

Испытания на износостойкость проведены с использованием вибрационного модуля машины трения SRV-III Test System. Оценивались коэффициент трения и величина совместного износа в парах трения "покрытие/шарик из стали ШХ15" и "покрытие/шарик из сплава WC-6 мас.% Co". Диаметр шариков был равен 9 мм. Измерения проводились при комнатной температуре без использования смазочных материалов. Постоянная нагрузка на шарик составляла 10 Н, частота осцилляций шарика – 10 Гц, длина пути – 3 мм, длительность испытания – 10 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фазовый состав механосплавленного порошка и покрытия

Дифрактограммы порошка и полученного из него покрытия показаны на рис. 1. В составе порошка присутствуют фазы метастабильного карбогидрида ниобия, гидрида ниобия, медь и железо, появившееся в результате намола. Из-за большой ширины линий проведение количественного фазового анализа затруднено. По полученным ранее для отожженных порошков данным [6] намол железа составил около 9 об.%.

В покрытии, полученном из данного порошка, преобладают фазы NbC (PDF 5-658) и Nb₂C (PDF 15-127), присутствуют медь и значительное количество железа. Помимо этого, присутствует набор линий фазы Fe₃Nb₃C (PDF 17-128). Количественный фазовый состав и параметры решетки приведены в таблице.

Рис. 1. Дифрактограмма (a) порошка и (b) покрытия из него

Fig. 1. XRD patterns of (a) mechanically alloyed powder and (b) coating

Таблица – Фазовый состав покрытия (об.%) и параметры решеток (a, c) фаз

Table – Phase composition (vol.%) of the coating and lattice parameters (a, c)

Фаза/Phase	NbC	Nb ₂ C	Fe ₃ Nb ₃ C	α-Fe	Cu
(±3 %)	38	13	12	26	11
a, c (±0.001 Å)	4.443(3)	3.118(2) 4.976(4)	11.366(7)	2.882(2)	3.639(2)

В покрытии соотношение Nb:Fe равно 64:36, а если убрать вклад от α-Fe (материала подложки), то данное соотношение составляет 93:7. В порошке соотношение доли ниобия к доле намолотого железа составляло 91:9. Таким образом, можно сделать вывод, что фаза Fe₃Nb₃C формируется только за счет железа, намолотого в процессе механического сплавления.

По результатам количественного фазового анализа полученные массовые пропорции Nb:Cu = 83:17 отличаются от исходного состава (87:13). Это связано с уходом части ниобия в состав твердых растворов с медью и железом. Параметры решеток меди и железа (таблица) значительно увеличены по сравнению с эталонными значениями – 3.615 Å и 2.867 Å,

соответственно. Параметр решетки NbC близок к эталонному значению для NbC_{0.75} (4.445 Å). Для Nb₂C параметры в целом близки к эталонным (3.115 и 4.950 Å). Параметр решетки Fe₃Nb₃C составил около 11.37 Å, эталонное значение – 11.3 Å. В фазах подобного типа, например, в карбидах Fe₃W₃C и Fe₆W₆C [13], соотношение металлических компонент может не соответствовать стехиометрии. По этой причине полученный параметр решетки может отличаться от эталонного, а фазу корректнее будет обозначать как (Fe,Nb)₆C.

На рис. 2 показаны СЭМ изображения поверхности покрытия при разных увеличениях. Там же показан состав разных участков. Вид покрытия свидетельствует о том, что частицы порошка сплавляются с материалом подложки. Массовое соотношение Nb:Cu на выделенном участке поверхности (рис. 2, b) составляет 84:16. Наиболее темные зоны соответствуют порам и выемкам на отшлифованной поверхности. В составе таких зон присутствует значительное количество углерода. На изображении преобладают серые и светло-серые зоны. Чем больше железа и меньше содержание меди в составе зон, тем они кажутся темнее. В серых зонах массовые соотношения Nb:Cu равны 92:8, Nb:Fe = 57:43, в светло-серых зонах соотношения Nb:Cu = 88:12 и Nb:Fe = 78:22. Оба типа зон представляют собой смесь карбидов Nb₂C, NbC_{0.75}, (Nb,Fe)₆C с медью и железом. Богатые железом зоны сформировались в местах выхода расплава подложки на поверхность, а зоны, богатые ниобием и медью, сформировались на основе механосплавленного порошка и содержат скопления включений карбидных фаз.

Рис. 2. СЭМ изображения поверхности покрытия при разных увеличениях: а) $\times 500 \mu\text{m}$, б) $\times 100 \mu\text{m}$

Fig. 2. SEM images taken at different magnification for the coating surface: a) $\times 500 \mu\text{m}$, b) $\times 100 \mu\text{m}$

Рис. 3. СЭМ изображения сечения покрытия при разных увеличениях: а) $\times 5 \mu\text{m}$, б) $\times 2 \mu\text{m}$

Fig. 3. SEM images taken at different magnifications for the cross section of coating: a) $\times 5 \mu\text{m}$, b) $\times 2 \mu\text{m}$

На рис. 3 приведены сечения покрытия при разных увеличениях и показаны составы разных зон. Толщина покрытия после шлифовки и полировки составила 5 – 10 мкм на разных участках. Переход от покрытия к подложке довольно равномерный, трещины и зоны

расслоения между ними отсутствуют (рис. 3, *b*). Ближе к подложке концентрация железа постепенно увеличивается. По толщине покрытия наблюдаются редкие мелкие поры и неоднородность по химическому составу. На рис. 3, *a* отображены соседние зоны – обогащенная ниобием и медью и обогащенная железом. Между ними также присутствует переходная зона.

Свойства покрытия

Области, обогащенные ниобием и медью и обогащенные железом, довольно крупные, что позволило провести в каждой из них измерения твердости. В зонах поверхности, богатых ниобием и медью и содержащих больше карбидных фаз, твердость составила (10.8 ± 1.9) ГПа. Твердость зон, богатых железом, равна (6.5 ± 0.8) ГПа. Для сравнения твердость $\text{NbC}_{0.75}$ равна 14 – 27 ГПа [14 – 16], Nb_2C – около 13 ГПа [16]. Твердость $(\text{Fe,Nb})_6\text{C}$ неизвестна.

Временные зависимости коэффициентов трения и общего износа в парах трения "покрытие/стальной шарик" и "покрытие/шарик из сплава WC-Co" показаны на рис. 4. Независимо от типа использованного контртела (сталь или сплав WC-Co) начальный коэффициент трения равен 0.25. Коэффициент трения и величина износа возрастают со временем испытания. Наибольший коэффициент трения наблюдается при испытаниях поверхности в паре со стальным шариком, он составляет около 0.9. В паре с шариком из карбида вольфрама значение коэффициента трения не превышает 0.7. Резкие скачки коэффициента трения для покрытия при испытании со стальным шариком, скорее всего, обусловлены более интенсивными адгезионными и окислительными процессами, протекающими в контактной зоне. Характер зависимости в случае с шариком из карбида вольфрама более монотонный. Максимальный износ в паре со стальным шариком составил ~7 мкм, с шариком из карбида вольфрама – около 4 мкм.

Рис. 4. Временные зависимости коэффициента трения (k) и величины совместного износа (μm) в трибопарах: а) покрытие/стальной шарик, б) покрытие/шарик из сплава WC-Co

Fig. 4. Time dependences of the friction coefficient (k) and wear (μm) in the (a) coating/steel ball and (b) coating/WC-Co ball tribo-pairs

Оптические изображения дорожек износа на покрытии и шариках показаны на рис. 5. Видимого износа поверхности покрытия и следов царапания не наблюдается. Судя по желтовато-бурому цвету дорожек, имеет место загрязнение контактных поверхностей оксидами железа. Поверхность стального шарика стерлась, износ шарика (по оценке высоты стертого шарового сегмента) составил около 8 мкм, что близко к величине общего износа в трибопаре. После испытания шариком из сплава WC-Co износ поверхности шарика составил 4 мкм, что также совпадает с величиной общего износа в трибопаре.

Таким образом, в обоих случаях преимущественно изнашивается контртело, покрытие обладает высокой износостойкостью. Для подробного анализа механизмов изнашивания и поведения покрытий в контактной зоне необходимо проведение дополнительных исследований.

a) В трибопаре "покрытие/стальной шарик"
Coating/steel ball tribo-pair

b) В трибопаре "покрытие/шарик из сплава WC-Co"
Coating/WC-Co ball tribo-pair

c) Стальной шарик
Steel ball

d) Шарик из сплава WC-Co
WC-Co ball

Рис. 5. Оптические изображения дорожки износа на поверхности (a, b) покрытий и (c, d) шариков

Fig. 5. Optical images of the wear traces on the surface of (a, b) coatings and (c, d) balls

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоскоростным селективным лазерным спеканием механически сплавленных в петролейном эфире порошков ниобия и меди получены покрытия на поверхности железных пластинок.

Методом рентгеноструктурного анализа показано, что покрытия состоят из фаз $\text{NbC}_{0.75}$, Nb_2C , $(\text{Fe,Nb})_6\text{C}$, твердых растворов ниобия в Cu и Fe. Фаза $(\text{Fe,Nb})_6\text{C}$ формируется преимущественно за счет железа, вошедшего в состав порошка в процессе механосплавления.

Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что полученные покрытия прочно связаны с подложкой, трещины и расслоения, поры на границе с подложкой отсутствуют. В микроструктуре покрытий преобладают два типа зон: зоны, обогащенные

ниобием и медью и содержащие большее количество карбидных фаз, и зоны, обогащенные железом, которые сформировались в результате перемешивания порошка с расплавом подложки. Твердость зон первого типа – около 11 ГПа, второго – порядка 7 ГПа.

Трибологические испытания, проведенные на полированных покрытиях толщиной 5 – 10 мкм, показали, что последние практически не изнашиваются при испытаниях с шариками из стали и сплава на основе карбида вольфрама.

Коэффициенты трения изначально равны 0.25, к концу испытаний не превышают 0.9 (со стальным контртелом) и 0.7 (с контртелом из WC-Co).

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ (№ 18-48-180003).

При выполнении работ было использовано оборудование Центра коллективного пользования "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

The research was carried out with the support of the RFBR grant (No. 18-48-180003).

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS.

Авторы выражают благодарность В.Ф. Лысу (УдмФИЦ УрО РАН) за проведение трибологических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов А. К., Углов В. В., Анищик В. М., Русальский Д. П. Синтез высокотвердых покрытий из наноразмерных карбидов ниобия, меди на твердосплавном дереворежущем инструменте // Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы 12 Международной конференции, Минск, Беларусь, 19-22 сентября 2017 г. Минск: БГУ, 2017. С. 380-382. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/182271>
2. Yan H., Chen Z., Zhao J., Zhang P., Yu Z., Lu Q. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process // Journal of Materials Research and Technology, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 9907-9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>
3. Prysazhnyuk P., Lutsak D., Shlapak L., Aulin V., Lutsak L., Borushchak L., Shihab T. Development of the composite materials and coatings based on niobium carbide // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1996, vol. 6, no. 12, pp. 43-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150807>
4. Fernandes F. A. P., Gallego J., Picon C. A., Tremiliosi Filho G., Casteletti L. C. Wear and corrosion of niobium carbide coated AISI 52100 bearing steel // Surface and Coatings Technology, 2015, vol. 279, pp. 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.036>
5. Almeida A., Eugénio S., Livramento V., Marques M. T., Correia J. B., Vilar R. Laser cladding of Cu-NbC nanocomposite coatings // International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 2006, vol. 2006, 1001. <https://doi.org/10.2351/1.5060743>
6. Eryomina M. A., Lomayeva S. F. Mechano-synthesis of TiC(NbC)-Cu composites using liquid hydrocarbons // Materials Today: Proceedings, 2019, vol. 12, pp. 151-154. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.085>
7. Gualtieri T., Bandyopadhyay A. Niobium carbide composite coatings on SS304 using laser engineered net shaping (LENSTM) // Materials Letters, 2017, vol. 189, pp. 89-92. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.071>
8. Li Y., Zhang D., Wang H., Cong W. Fabrication of a TiC-Ti matrix composite coating using ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: The effects of ultrasonic vibration and TiC content // Metals, 2021, vol. 11, pp. 693. <https://doi.org/10.3390/met11050693>
9. Yang Y., Zhang C., Wang D., Nie L., Wellmann D., Tian Y. Additive manufacturing of WC-Co hardmetals: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, vol. 108, pp. 1653-1673. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05389-5>
10. King D., Middendorf J., Cissel K., Key T., Carney C. Selective laser melting for the preparation of ultra-high temperature ceramic coatings // Ceramics International, 2019, vol. 45(2A), pp. 2466-2473. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.173>

11. Kharanzhevskiy E., Reshetnikov S. Chromium oxide dissolution in steels via short pulse laser processing // *Applied Physics A*, 2014, vol. 115, pp. 1469-1477. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8064-x>
12. Костенков С. Н., Харанжевский Е. В., Кривилев М. Д. Метод определения характеристик взаимодействия лазерного излучения с нанокompозитными порошковыми материалами // *Физика металлов и металловедение*. 2012. Т. 113. С. 98-103. <https://doi.org/10.1134/S0031918X12010061>
13. Eryomina M. A., Lomayeva S. F., Lyalina N. V., Syugaev A. V., Paragin S. N., Tarasov V. V. Structure and properties of mechanosynthesized W-Fe-C carbides // *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 25, pp. 356-359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.089>
14. Cai X., Zhong L., Wang J., Shao T., Zhao N., Xu Y. Microstructure and hardness of NbC coating produced in situ // *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1120-1121, pp. 745-749. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.745>
15. Changchun Z., Yefei Z., Xiaolei X., Sha L., Xuejun R., Qingxiang Y. Investigation on the relationship between NbC and wear-resistance of Fe matrix composite coatings with different C contents // *Applied Surface Science*, 2018, vol. 439, pp. 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.034>
16. Wu L., Wang Y., Yan Z., Zhang J., Xiao F., Liao B. The phase stability and mechanical properties of Nb-C system: Using first-principles calculations and nano-indentation // *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 561, pp. 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.200>

REFERENCES

1. Kuleshov A. K., Uglov V. V., Anishchik V. M., Rusal'skiy D. P. Sintez vysokotverdykh pokrytij iz nanorazmernih karbidov niobiya, medi na tverdospavnom derevorezhushchem instrumente [Synthesis of high hardness coatings from nanosized carbides of niobium, copper on hard alloy wood-cutting tools]. *Vzaimodejstvie izlucheniya s tverdyim telom* [Interaction of Radiation with Solids]. Materialy 12 Mezhdunarodnoy konferentsii, Minsk, Belarus', BGU, 2017, pp. 380-382. (In Belarus). <http://elib.bsu.by/handle/123456789/182271>
2. Yan H., Chen Z., Zhao J., Zhang P., Yu Z., Lu Q. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 9907-9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>
3. Prysyazhnyuk P., Lutsak D., Shlapak L., Aulin V., Lutsak L., Borushchak L., Shihab T. Development of the composite materials and coatings based on niobium carbide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1996, vol. 6, no. 12, pp. 43-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150807>
4. Fernandes F. A. P., Gallego J., Picon C. A., Tremiliosi Filho G., Casteletti L. C. Wear and corrosion of niobium carbide coated AISI 52100 bearing steel. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 279, pp. 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.036>
5. Almeida A., Eugénio S., Livramento V., Marques M. T., Correia J. B., Vilar R. Laser cladding of Cu-NbC nanocomposite coatings. *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*, 2006, vol. 2006, 1001. <https://doi.org/10.2351/1.5060743>
6. Eryomina M. A., Lomayeva S. F. Mechanosynthesis of TiC(NbC)-Cu composites using liquid hydrocarbons. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 12, pp. 151-154. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.085>
7. Gualtieri T., Bandyopadhyay A. Niobium carbide composite coatings on SS304 using laser engineered net shaping (LENSTM). *Materials Letters*, 2017, vol. 189, pp. 89-92. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.071>
8. Li Y., Zhang D., Wang H., Cong W. Fabrication of a TiC-Ti matrix composite coating using ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: The effects of ultrasonic vibration and TiC content. *Metals*, 2021, vol. 11, pp. 693. <https://doi.org/10.3390/met11050693>
9. Yang Y., Zhang C., Wang D., Nie L., Wellmann D., Tian Y. Additive manufacturing of WC-Co hardmetals: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp. 1653-1673. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05389-5>
10. King D., Middendorf J., Cissel K., Key T., Carney C. Selective laser melting for the preparation of ultra-high temperature ceramic coatings. *Ceramics International*, 2019, vol. 45(2A), pp. 2466-2473. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.173>
11. Kharanzhevskiy E., Reshetnikov S. Chromium oxide dissolution in steels via short pulse laser processing. *Applied Physics A*, 2014, vol. 115, pp. 1469-1477. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8064-x>
12. Kostenkov S.N., Haranzhevskij E.V., Krivilev M.D. Metod opredeleniya harakteristik vzaimodejstviya lazernogo izlucheniya s nanokompozitnymi poroshkovymi materialami [Determination of characteristics of laser radiation interaction with nanocomposite powder materials]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography]. 2012, T. 113, C. 98-103. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S0031918X12010061>
13. Eryomina M. A., Lomayeva S. F., Lyalina N. V., Syugaev A. V., Paragin S. N., Tarasov V. V. Structure and properties of mechanosynthesized W-Fe-C carbides. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 25, pp. 356-359. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.089>

14. Cai X., Zhong L., Wang J., Shao T., Zhao N., Xu Y. Microstructure and hardness of NbC coating produced in situ. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1120-1121, pp. 745-749. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.745>
15. Changchun Z., Yefei Z., Xiaolei X., Sha L., Xuejun R., Qingxiang Y. Investigation on the relationship between NbC and wear-resistance of Fe matrix composite coatings with different C contents. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 439, pp. 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.034>
16. Wu L., Wang Y., Yan Z., Zhang J., Xiao F., Liao B. The phase stability and mechanical properties of Nb-C system: Using first-principles calculations and nano-indentation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 561, pp. 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.200>

Поступила 14.09.2021; принята к опубликованию 19.10.2021
Received 14 September 2021; accepted 19 October 2021

Еремина Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: mrere@udman.ru

Marina A. Eryomina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Ломаева Светлана Федоровна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Svetlana F. Lomayeva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

Харанжевский Евгений Викторович, доктор технических наук, доцент, руководитель лаборатории, УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Evgeniy V. Kharanzhevskii, Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of the Laboratory, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

Тарасов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация

Valery V. Tarasov, Dr. Sci. (Techn.), Professor, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation