



УДК 536.425:539.25:669.017

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-191-196



Оригинальная статья
Original article

МНОГОСЛОЙНЫЕ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ

Ю. Ф. Иванов[✉], Н. А. Прокопенко, Е. А. Петрикова,
В. В. Шугуров, А. Д. Тересов

■ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 2/3)

✉ yufi55@mail.ru

Аннотация. Высокоэнтропийные сплавы являются многоэлементными материалами и содержат не менее пяти элементов близкой концентрации. Высокоэнтропийные сплавы являются, как правило, однофазными термодинамически стабильными твердыми растворами замещения, преимущественно на основе объемноцентрированной кубической и гранецентрированной кубической кристаллической решеток. Стабилизация твердого раствора при кристаллизации высокоэнтропийного сплава обеспечивается взаимодействием ряда факторов, а именно, высокой энтропией смешения, низкой скоростью диффузии компонентов, малой скоростью роста кристаллитов из расплава. Целью настоящей работы являлось получение новых знаний о структуре и свойствах высокоэнтропийных пленок, синтезированных на металлической подложке при осаждении многоэлементной металлической плазмы в среде аргона. Плазма была сформирована в результате электродугового с плазменным ассистированием независимого распыления катодов титана, алюминия, меди, ниобия, циркония. В результате выполненных исследований выявлен режим осаждения, который позволяет формировать пленки различной толщины близкого к эквивалентному составу. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что пленки являются многослойными образованиями, имеют наноразмерную аморфно-кристаллическую структуру. Микротвердость пленок существенным образом зависит от соотношения количества образующих элементов и изменяется в пределах от 12 до 14 ГПа, модуль Юнга – от 230 до 310 ГПа. Кристаллизацию пленок осуществляли путем облучения импульсным электронным пучком. В результате обработки формируется двухфазное состояние. Основной фазой является α -NbZrTiAl с объемноцентрированной кубической кристаллической решеткой с параметром 0,32344 нм; вторая фаза состава CuZr имеет простую кубическую решетку.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, пленка-подложка, многоэлементная плазма, импульсный электронный пучок, структура, твердость, износостойкость, коэффициент трения

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-58-00006 (анализ структуры пленки ВЭС) и гранта Российского научного фонда, проект № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> (изготовление пленок ВЭС).

Авторы выражают благодарность О.С. Толкачеву за активное участие в работе. Результаты ПЭМ-анализа получены на базе Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Тересов А.Д. Многослойные аморфно-кристаллические высокоэнтропийные металлические пленки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(2):191–196.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-191-196>

MULTILAYER AMORPHOUS-CRYSTALLINE HIGH-ENTROPY METAL FILMS

Yu. F. Ivanov[✉], N. A. Prokopenko, E. A. Petrikova,
V. V. Shugurov, A. D. Teresov

■ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ yufi55@mail.ru

Abstract. High-entropy alloys (HEA) are multi-element materials and contain at least five elements of similar concentration. HEA are, as a rule, single-phase thermodynamically stable substitutional solid solutions, mainly based on a body-centered cubic and face-centered cubic crystal lattice. Solid solution stabilization during the crystallization of a high-entropy alloy is provided by the interaction of a number of factors, namely, a high mixing entropy and low diffusion rate of components, and a low growth rate of crystallites from the melt. The purpose of this work was to obtain new

knowledge about the structure and properties of high-entropy films synthesized on a metal substrate during deposition of a multi-element metal plasma in argon atmosphere. The plasma was formed as a result of independent plasma-assisted electric arc cathodes of the following metals: Ti, Al, Cu, Nb, Zr sputtering. As a result of the performed studies, the deposition mode was revealed, which allows the formation of films of various thicknesses of close to equiatomic composition. Transmission electron microscopy methods have established that the films are multilayer formations and have nanoscale amorphous-crystalline structure. Microhardness of the films significantly depends on the ratio of number of the forming elements and varies from 12 to 14 GPa, Young's modulus – from 230 to 310 GPa. Crystallization of the films was carried out by irradiation with a pulsed electron beam. As a result of processing, a two-phase state is formed. The main phase is α -NbZrTiAl with a volume-centered cubic crystal lattice with a parameter of 0.32344 nm; the second phase of CuZr composition has a simple cubic lattice.

Keywords: high-entropy alloy, substrate film, multi-element plasma, pulsed electron beam, structure, hardness, wear resistance, friction coefficient

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 20-58-00006 (analysis of the HEA film structure) and by Russian Science Foundation, grant No. 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> (production of HEA films).

The authors express their gratitude to O.S. Tolkachev for active participation in the work. The results of the TEM analysis were obtained on the basis of the Scientific and Educational Innovation Center “Nanomaterials and Nanotechnologies” of the National Research Tomsk Polytechnic University.

For citation: Ivanov Yu.F., Prokopenko N.A., Petrikova E.A., Shugurov V.V., Teresov A.D. Multilayer amorphous-crystalline high-entropy metal films. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):191–196. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-191-196>

ВВЕДЕНИЕ

Называемые высокоэнтропийными сплавы состоят из нескольких (как правило, пяти и более) основных элементов близкой концентрации в отличие от обычных сплавов с одним и редко двумя основными элементами и большим количеством легирующих элементов. Разработка таких сплавов указывает на появление новой парадигмы в дизайне современных материалов [1 – 3]. Как правило, высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) обладают уникальным сочетанием механических, трибологических, физических, химических и многих других свойств. В большинстве случаев ВЭС являются однофазными термодинамически стабильными твердыми растворами замещения, преимущественно на основе ОЦК или ГЦК кристаллической решетки [4].

Предполагается, что стабилизация твердого раствора при кристаллизации ВЭС обеспечивается высокой энтропией смешения компонентов сплава в жидком состоянии, искажением кристаллической решетки, замедлением диффузии атомов и так называемым «коктейльным эффектом» [5]. В многочисленных исследованиях показано, что ВЭС могут иметь наноразмерную структуру или даже находиться в аморфном состоянии, что является следствием низкой скорости диффузии элементов и малой скорости роста кристаллитов [6; 7].

В работе [8] показано, что ВЭС могут заменить жаропрочные сплавы на основе никеля и могут быть использованы в качестве высокотемпературного материала следующего поколения. Высказано мнение, что ввиду уникальности свойств использование ВЭС в качестве потенциального материала покрытия для высокотемпературных применений является весьма перспективным. В качестве примера приведены исследования покрытия ВЭС состава $\text{NiCo}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_{1.5}\text{SiAlTi}_{0.2}$, обработанного SPS (электроискровое спекание) и APS (распыление атмосферной плазмой) методами, в сравнении с результатами испытания литого MCrAlY сплава. Авторы работы [8] пришли к выводу, что покрытия ВЭС, обработанные SPS и APS, могут заменить обычные MCrAlY сплавы в качестве наплавочного материала для высоко-

температурного применения из-за их значительной высокотемпературной твердости, хорошего сопротивления окислению, низкой теплопроводности при низком температурном расширении.

Авторы работы [5] считают, что фокус исследования ВЭС должен отойти от попыток получить однофазные сплавы эквиатомного состава и вместо этого разрабатывать сплавы, которые обладают правильным балансом механизмов упрочения и механических свойств. Подтверждая выводы авторов работы [5], в ряде работ [9 – 12] показано, что к высокоэнтропийным сплавам могут быть отнесены многокомпонентные сплавы неэквиатомного состава, к тому же не являющиеся однофазными твердыми растворами. По результатам, представленным в работах [13 – 15], к недостаткам ВЭС можно отнести то, что ВЭС из тугоплавких элементов обладают высокими плотностью (высокий удельный вес) и хрупкостью. Несмотря на то, что годовая публикационная активность в области исследований ВЭС (на основе анализа результатов поиска «высокоэнтропийные сплавы» в Scopus) [16; 17] стремительно возрастает, до настоящего времени нет единой точки зрения о природе формирования замечательных свойств этих материалов.

Целью выполненных исследований является получение новых знаний о структуре и свойствах ВЭС, синтезированных в виде тонких (до 5 мкм) пленок ионно-плазменным методом, заключающимся в осаждении многоэлементной металлической плазмы, которая создана электродуговым плазменно ассистированным одновременным независимым распылением катодов выбранных элементов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве элементов, формирующих ВЭС, использованы титан, алюминий, медь, цирконий и ниобий. Подложками, на которые напыляли пленки ВЭС, являлись предварительно полированные образцы стали аустенитного класса 12X18H10T, сплава титана ВТ1-0 и твердого сплава ВК8. Формирование пленок ВЭС

толщиной до 5 мкм проводили на ионно-плазменной установке КВИНТА, разработанной в лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН и входящей в составе комплекса УНИКУУМ в перечень уникальных электрофизических установок России (<https://ckp-rf.ru/usu/434216/>) [18]. Часть пленок ВЭС была дополнительно облучена импульсным электронным пучком (установка СОЛО [19]) при следующих параметрах: длительность импульса пучка электронов 50 мкс; плотность энергии пучка электронов 20 Дж/см²; количество импульсов воздействия 3 при частоте следования импульсов 0,3 с⁻¹. Особенностью воздействия импульсного пучка электронов, позволяющей формировать ультрамелкую (вплоть до аморфного состояния) структуру, является сверхвысокая (до 10⁶ К/с) скорость охлаждения материала за счет теплоотвода в интегрально холодную подложку [20].

Исследования структуры, фазового и элементного составов пленок ВЭС осуществляли методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Состояние кристаллической решетки анализировали методами рентгеноструктурного анализа. Механические свойства пленок определяли путем измерения микротвердости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе работы были проведены эксперименты по нанесению многоэлементных пленок металлов, исследованы режимы генерации газо-металлической плазмы, исследовано радиальное распределение плотности ионного тока из плазмы для источников металлической и газовой плазмы, измерены скорости нанесения пленок отдельных компонентов, определен элементный состав пленки,

выполненный методами микрорентгеноспектрального анализа, выявлен оптимальный режим нанесения пленок ВЭС. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа выполнены исследования элементного и фазового составов, состояния дефектной субструктуры (относительная концентрация атомов, размеры, форма, расположение и объемная доля фаз, скалярная плотность дислокаций и тип дислокационной субструктуры, размер зерен и субзерен) сформированных ВЭС и ВЭС, облученных импульсным электронным пучком. Показано, что пленки ВЭС являются многослойным рентгеноаморфным материалом (рис. 1). Толщина слоев изменяется в пределах от 12 до 23 нм. Размер кристаллитов, формирующих слои, составляет 2 – 3 нм. Установлено, что твердость пленок ВЭС изменяется в пределах 12 – 14 ГПа, модуль Юнга – 230 – 310 ГПа.

Облучение пленки ВЭС импульсным электронным пучком (20 Дж/см², 50 мкс, 3 имп.) сопровождается высокоскоростной кристаллизацией материала с образованием ячеистой структуры (рис. 2).

Размер ячеек изменяется в пределах 300 – 600 нм. Ячейки окаймлены прослойками второй фазы. Толщина прослоек изменяется в пределах 20 – 110 нм. Объем ячеек сформирован фазой состава α -NbZrTiAl, имеющей ОЦК кристаллическую решетку с параметром 0,32344 нм; прослойки второй фазы образованы сплавом CuZr (простая кубическая решетка).

Твердость пленок, измеренная при нагрузке на индентор 30 мН, изменяется в пределах от 6,9 до 8,8 ГПа и снижается при увеличении плотности энергии пучка электронов. Установлено, что высокие значения твердости исследуемого материала обусловлены субструктурным (упрочнение границами субзерен, ячеек высокоскоростной кристаллизации), дисперсионным

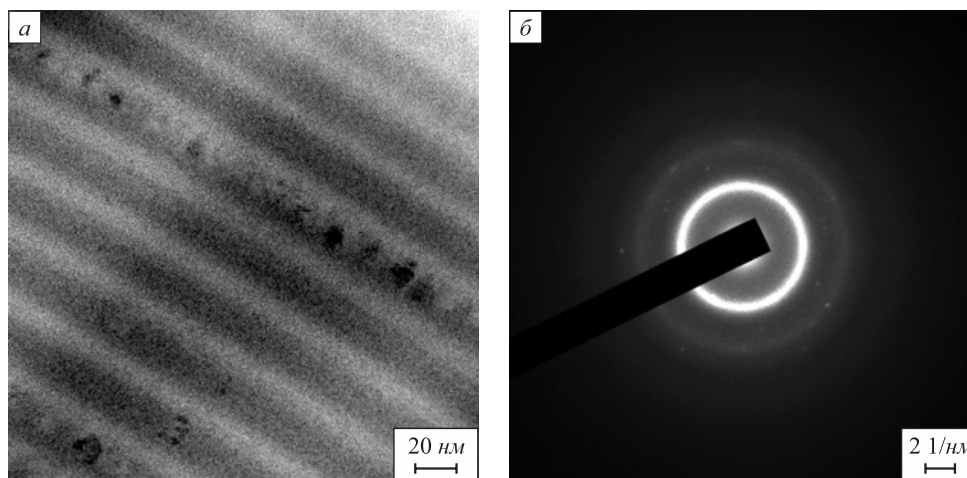


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение многослойной пленки ВЭС, сформированной в результате осаждения на подложку многоэлементной плазмы:
а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма

Fig. 1. Electron microscopic image of HEA multilayer film formed as a result of multi-element plasma deposition on a substrate:
а – bright field; б – microelectron diffraction pattern

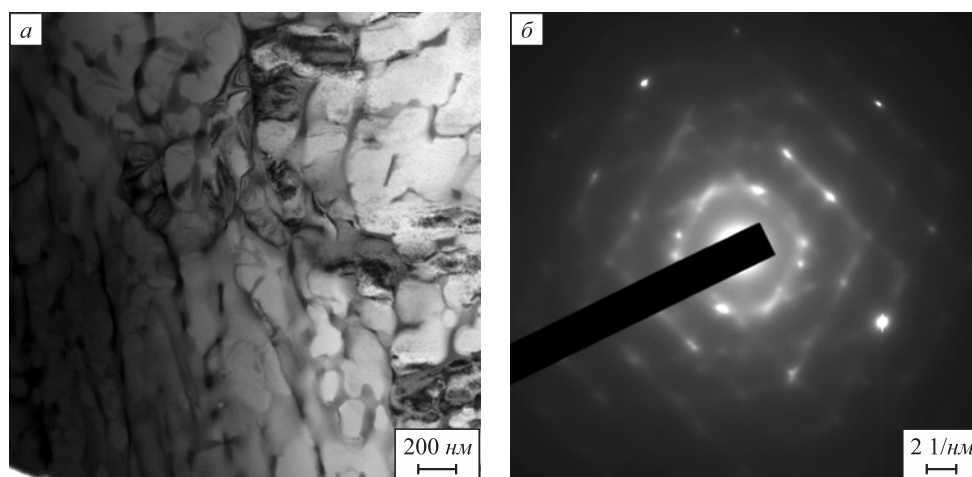


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение многослойной пленки ВЭС, сформированной в результате осаждения на подложку многоэлементной плазмы и дополнительно облученной импульсным электронным пучком: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма

Fig. 2. Electron-microscopic image of HEA multilayer film formed as a result of multi-element plasma deposition on a substrate and additionally irradiated with a pulsed electron beam: а – bright field; б – microelectron diffraction pattern

(упрочнение наноразмерными частицами второй фазы, расположенными по границам ячеек кристаллизации) и твердорастворным (упрочнение, имеющее место вследствие искажения кристаллической решетки атомами элементов, формирующих сплав) механизмами. Не следует также исключать упрочнение внутренними полями напряжений, формирующимися вследствие присутствия в материале фаз с различными коэффициентами термического расширения.

Выводы

Выявлен оптимальный режим нанесения пленок ВЭС (с позиции минимизации энергозатрат формирования ВЭС элементного состава, близкого к эквивалентному, обладающего высокими прочностными свойствами), позволивший сформировать многослойные аморфно-кристаллические пленки следующего элементного состава: 25,7Ti–17,0Al–21,9Nb–22,3Zr–13,6Cu. Установлено, что дополнительное облучение пленок импульсным электронным пучком приводит (в условиях высокоскоростного охлаждения) к формированию структуры ячеистой кристаллизации с субмикронным размером ячеек. Объем ячеек сформирован фазой состава α -NbZrTiAl, имеющей ОЦК кристаллическую решетку с параметром 0,32344 нм; по границам ячеек расположены прослойки второй фазы состава CuZr (простая кубическая решетка).

Полученные результаты позволяют рекомендовать экологически чистый, поддающийся полной автоматизации электронно-ионно-плазменный метод формирования ВЭС для оказания научных и технологических услуг, направленных на повышение служебных характеристик деталей и изделий различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*. 2016;19(6): 349–362. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026>
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Material Science and Engineering: A*. 2004;375-377: 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
4. Mao H., Chen H.L., Chen Q. TCHEA1: A thermodynamic database not limited for “high entropy” alloys. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2017;38:353–368. <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0570-7>
5. Pickering E.J., Jones N.G. High-entropy alloys: A critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*. 2016;61(3):183–202. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1180020>
6. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе. *Успехи химии*. 2014;83(11):1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
Pogrebnyak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Russian Chemical Reviews*. 2014;83(11):1027–1061. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
7. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122: 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>

8. Praveen S., Kim H.S. High-entropy alloys: Potential candidates for high-temperature applications – An overview. *Advanced Engineering Materials*. 2018;20(1):1700645. <https://doi.org/10.1002/adem.201700645>
9. Nene S.S., Liu K., Frank M., Mishra R.S., Brennan R.E., Cho K.C., Li Z., Raabe D. Enhanced strength and ductility in a friction stir processing engineered dual phase high entropy alloy. *Scientific Reports*. 2017;7:16167. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16509-9>
10. Li Zh., Körmann F., Grabowski B., Neugebauer J., Raabe D. Ab initio assisted design of quinary dual-phase high-entropy alloys with transformation-induced plasticity. *Acta Materialia*. 2017;136:262–270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
11. Basu S., Li Zh., Pradeep K.G., Raabe D. Strain rate sensitivity of a TRIP-assisted dual-phase high-entropy alloy. *Frontiers in Materials*. 2018;5. <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00030>
12. Li Zh., Tazan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Scientific Reports*. 2017;7:40704. <https://doi.org/10.1038/srep40704>
13. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтروпийных сплавов. *Авиационные материалы и технологии*. 2018;2(51):3–8. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8>
Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bol'shakova A.N. Problems of creation and prospects of use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2018; 2(51):3–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8>
14. Juan C.-C., Tsai M.-H., Tsai C.-W., Lin C.-M., Wang W.-R., Yang C.O.C., Chen S.-K., Lin S.-J., Yeh J.-W. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*. 2015;62:76–83. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.03.013>
15. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippan R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2015;96:258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
16. Gu J., Zou J., Sun S.-K., Wang H., Yu S.-Y., Zhang J., Wang W., Fu Z. Dense and pure high-entropy metal diboride ceramics sintered from self-synthesized powders via boron/carbothermal reduction approach. *Science China Materials*. 2019;62(12):1898–1909. <https://doi.org/10.1007/s40843-019-9469-4>
17. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer Nature Switzerland AG, 2021:110. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
18. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Ахмадеев Ю.Х., Крысина О.В., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Лопатин И.В. Разработка комплексной технологии электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий. *Наноинженерия*. 2015;4(46):4–13. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Akhmadееv Yu.Kh., Krysinina O.V., Petrikova E.A., Shugurov V.V., Lopatin I.V. Development of complex technology of electronic ion-plasma engineering of a surface of materials and products. *Nanoinzheneriya*. 2015;4(46):4–13. (In Russ.).
19. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Получение высокоэнергетических электронно-ионных пучков в системах с плазменным эмиттером. *Известия вузов. Физика*. 2001;44(9):36–43. Devyatkov B.N., Koval' N.N., Shchanin P.M. Obtaining high-current low-energy electron beams in systems with plasma emitter. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2001;44(9):36–43. (In Russ.).
20. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(5):60–70. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron beams. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008;51(5):60–70. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Никита Андреевич Прокопенко, младший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-9381-872X
E-mail: nick08_phantom@mail.ru

Елизавета Алексеевна Петрикова, младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-1959-1459
E-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru

Владимир Викторович Шугуров, научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-6148-9442
E-mail: shugurov@opee.hcei.tsc.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-8022-7958
E-mail: yufi55@mail.ru

Nikita A. Prokopenko, Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-9381-872X
E-mail: nick08_phantom@mail.ru

Elizaveta A. Petrikova, Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-1959-1459
E-mail: petrikova@opee.hcei.tsc.ru

Vladimir V. Shugurov, Research Associate, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-6148-9442
E-mail: shugurov@opee.hcei.tsc.ru

Антон Дмитриевич Тересов, научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-5363-0108
E-mail: tad514@yandex.ru

Anton D. Teresov, Research Associate, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-5363-0108
E-mail: tad514@yandex.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Ю. Ф. Иванов – формулирование концепции работы, написание текста статьи, проведение электронно-микроскопических исследований, анализ и обсуждение результатов.

Н. А. Прокопенко – проведение процессов нанесения ВЭС покрытий, выявление оптимальных режимов напыления.

В. В. Шугуров – подготовка образцов и оборудования для нанесения ВЭС покрытий; обсуждение режимов, анализ результатов.

Е. А. Петрикова – проведение механических испытаний полученных покрытий, проведение исследований поверхности образцов методами сканирующей электронной микроскопии, обсуждение результатов.

А. Д. Тересов – подбор оптимальных режимов электронно-пучковой обработки образцов, проведение облучения, обсуждение результатов.

Yu. F. Ivanov – formulation of the work concept, writing the text, conducting electron microscopic studies, analysis and discussion of the results.

N. A. Prokopenko – applying HEA coatings, identification of the optimal spraying modes.

V. V. Shugurov – preparation of the samples and equipment for applying HEA coatings, discussion of modes, analysis of the results.

E. A. Petrikova – conducting mechanical tests of the obtained coatings, conducting studies of the samples surface by scanning electron microscopy, discussion of the results.

A. D. Teresov – selection of optimal modes of the samples electron beam processing, conducting irradiation, discussion of the results.

Поступила в редакцию 24.08.2022

После доработки 24.09.2022

Принята к публикации 10.01.2023

Received 24.08.2022

Revised 24.09.2022

Accepted 10.01.2023