

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.793.182

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.005

БОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННЫЕ НА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ: СТРУКТУРА, СВОЙСТВА**Юрий Федорович Иванов^{1†}, Владимир Викторович Шугуров², Иван Иванович Ажажа³,
Елизавета Алексеевна Петрикова⁴, Олег Сергеевич Толкачев⁵**^{1, 2, 3, 4, 5} Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² shugurov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6148-9442>³ vanya.azhazha@gmail.com⁴ petrikova@opec.hcei.tsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1959-1459>⁵ ole.ts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7816-9920>

Аннотация. Целью работы является анализ результатов, полученных при исследовании структуры, элементного и фазового состава, прочностных и трибологических свойств борсодержащих покрытий, полученных на высокоэнтропийном сплаве комплексным ионно-плазменным методом. В качестве материала подложки использовали сплав CoFeCrMnNi неэквивалентного состава (25,2Co, 15,1Cr, 37,8Fe, 3,4Mn, 16,3Ni; ат. %). Борсодержащие покрытия элементного состава Al–Mg–Ti–B толщиной 1, 3 и 5 мкм формировали методом ионно-плазменного высокочастотного напыления (магнетронное ВЧ-осаждение в условиях ионно-плазменного ассистирования при использовании генератора газовой (аргон) плазмы «ПИНК»). Для осуществления процесса напыления борсодержащего покрытия была использована мишень диаметром 200 мм, изготовленная из смеси двух порошков AlMgB₁₄ + 50 % TiB₂. Для интенсификации процесса распыления мишени был применен генератор газовой плазмы «ПИНК», с помощью которого в рабочей вакуумной камере установки создавалась объемная аргоновая плазма. При подаче ВЧ потенциала на мишень ионы аргона извлекались из плазмы и бомбардировали мишень, производя ее интенсивное распыление. Формирование покрытия на поверхности подложки происходит в результате подачи на нее напряжения смещения 35 В. Температура подложки при напылении покрытия (350–360) °С. Скорость напыления покрытия 0,05 мкм/мин. Исследования структуры и элементного состава борсодержащего покрытия элементного состава Al–Mg–Ti–B, сформированного на образцах высокоэнтропийного сплава состава CoFeCrMnNi комплексным ионно-плазменным методом осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии. Установлено, что покрытие имеет аморфно-кристаллическую структуру. Размер областей кристаллического состояния материала (3–5) нм. Твердость покрытия H = 11,0 ГПа; модуль Юнга E = 185 ГПа; отношение H/E = 0,059, параметр износа k = 4·10⁻⁷ мм³/Н·м; коэффициент трения μ = 0,12. Для подложки без покрытия H = 2,1 ГПа; k = 2,9·10⁻⁴ мм³/Н·м; μ = 0,62.

Ключевые слова: ионно-плазменный метод, высокоэнтропийный сплав, аморфно-кристаллический материал, борсодержащее покрытие, структура, свойства.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> с использованием оборудования ЦКП НМНТ ТПУ.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Ажажа И.И., Петрикова Е.А., Толкачев О.С. Борсодержащие покрытия, сформированные на высокоэнтропийном сплаве: структура, свойства // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 4. С. 462–468. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.005.

Original article

BORON-CONTAINING COATINGS FORMED ON A HIGH-ENTROPY ALLOY: STRUCTURE, PROPERTIES**Yurii F. Ivanov^{1†}, Vladimir V. Shugurov², Ivan I. Azhazha³, Elizaveta A. Petrikova⁴, Oleg S. Tolkachev⁵**^{1,2,3,4,5} Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² shugurov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6148-9442>³ vanya.azhazha@gmail.com⁴ petrikova@opec.hcei.tsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1959-1459>⁵ ole.ts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7816-9920>

Abstract. The aim of this work is to analyze the results obtained in the study of the structure, elemental and phase composition, strength and tribological properties of boron-containing coatings obtained on a high-entropy alloy by a complex ion-plasma method. The substrate material was a CoFeCrMnNi alloy of non-equiatom composition (25.2 Co, 15.1 Cr, 37.8 Fe, 3.4 Mn, 16.3 Ni; at. %). Boron-containing coatings of the Al–Mg–Ti–B elemental composition with a thickness of 1, 3, and 5 μm were formed by the high-frequency ion-plasma sputtering method (magnetron high-frequency deposition under conditions of ion-plasma assistance using a «PINK» gas (argon) plasma generator). A target 200 mm in diameter, made from a mixture of two AlMgB₁₄ + 50 % TiB₂ powders, was used to carry out the deposition of a boron-containing coating. A volume argon plasma was created in the working vacuum chamber of the setup with the help of gas plasma generator «PINK» to intensify the target sputtering process. Argon ions were extracted from the plasma when an RF potential was applied to the target and bombarded the target, producing its intense sputtering. The formation of a coating on the substrate surface occurs as a result of applying a bias voltage of 35 V to it. The temperature of the substrate during coating deposition is (350–360) °C. Coating deposition rate 0.05 $\mu\text{m}/\text{min}$. Studies of the structure and elemental composition of a boron-containing coating of the Al–Mg–Ti–B elemental composition formed on samples of a high-entropy CoFeCrMnNi alloy by a complex ion-plasma method were carried out by electron diffraction microscopy. It is established that the coating has an amorphous-crystalline structure. The size of the areas of the crystalline state of the material (3–5) nm. Coating hardness $H = 11.0$ GPa; Young's modulus $E = 185$ GPa; ratio $H/E = 0.059$, wear parameter $k = 4 \cdot 10^{-7} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$; friction coefficient $\mu = 0.12$. For an uncoated substrate, $H = 2.1$ GPa; $k = 2.9 \cdot 10^{-4} \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$; $\mu = 0.62$.

Keywords: ion-plasma method, high-entropy alloy, amorphous-crystalline material, boron-containing coating, structure, properties.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FEMN-2023-0003).

For citation: Ivanov, Yu. F., Shugurov, V. V., Azhazha, I. I., Petrikova, E. A. & Tolkachev, O. S. (2023). Boron-containing coatings formed on a high-entropy alloy: structure, properties. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 462–468. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.005.

Введение

Одной из возможных областей применения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), первые сообщения о которых появились в начале 21 века [1, 2], является атомная промышленность. В настоящее время перспективным и часто экономически более выгодным методом повышения служебных характеристик деталей машин и механизмов является формирование пленок и покрытий, в том числе керамических покрытий на основе боридов металлов [3–9]. Для атомной промышленности такие покрытия важны вследствие большого сечения захвата тепловых нейтронов у атомов бора [10].

Целью настоящей работы является анализ результатов, полученных при исследовании структуры, элементного и фазового состава, прочностных и трибологических свойств боросодержащих покрытий, полученных на высокоэнтропийном сплаве комплексным ионно-плазменным методом.

Материал и методики исследования

В качестве материала подложки использовали ВЭС CoFeCrMnNi неэквивалентного состава (25,2Co, 15,1Cr, 37,8Fe, 3,4Mn, 16,3Ni; ат. %) [11]. Образцы имели форму пластинок размерами (10×10×5) мм. Перед напылением покры-

тия поверхность образцов механически шлифовали и полировали; после помещения в камеру установки и последующего вакуумирования – дополнительно кратковременно (15 мин.) очищали плазмой аргона. Процесс напыления покрытия проводили на установке «КОМПЛЕКС», позволяющей последовательно осуществлять операции ионно-плазменной подготовки поверхности образцов и нанесения покрытий [12]. Для осуществления процесса напыления борсодержащего покрытия была изготовлена мишень диаметром 200 мм из смеси двух порошков AlMgB_{14} + 50 % TiB_2 [13]. Для интенсификации процесса распыления мишени был использован генератор газовой плазмы «ПИНК». С его помощью в рабочей вакуумной камере создавалась объёмная аргоновая плазма. При подаче ВЧ потенциала на мишень ионы аргона извлекались из плазмы и бомбардировали мишень, производя ее интенсивное распыление.

Технологический процесс нанесения покрытия состоял из следующих этапов. Образцы и мишень помещаются в вакуумную камеру, производится откачка до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па. В камеру подается аргон до давления 0,3 Па, включается плазменный генератор «ПИНК», подается отрицательное напряжение смещения величиной 950 В на подложку и осуществляется очистка и активация поверхности подложки аргоновой плазмой в течение 20 минут. После обработки поверхности и нагрева подложки до температуры (350-360) °С, включается ВЧ-генератор, подключенный к мишени, для инициации процесса распыления материала. Формирование покрытия на поверхности подложки происходит в результате подачи на нее напряжения смещения 35 В. Скорость напыления покрытия 0,05 мкм/мин. Таким образом, были сформированы на поверхности образцов ВЭС покрытия толщиной 1, 3 и 5 мкм.

Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «покрытие/подложка» проводили методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEOL JEM-2100F) электронной микроскопии. Твердость материала определяли по методу Оливера-Фарра [14] при усреднении результатов по 10 измерениям на нанотвердомере DUN-211S при нагрузке 30 мН. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating

TRIBOtester (TRIBOtechnic) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК8 диаметром 6 мм, радиус дорожки трения 2 мм, путь, пройденный контртелом, 100 м, нагрузка на индентор 1 Н. Трибологические испытания осуществляли в условиях сухого трения при комнатной температуре.

Результаты исследования и обсуждение

Установлено, методами микрорентгеноспектрального анализа, что сформированное на поверхности образцов ВЭС покрытие имеет следующий элементный состав (ат. %) 91,9В–3,7Mg–0,7Al–1,6Ti (остальное (2,1 ат. %) – захватываемые микроанализатором элементы подложки).

Исследование элементного состава методом «по точкам» (рис.1) выявило неоднородное распределение элементов в покрытии (рис.2). Установлено, что максимальное относительное содержание атомов бора фиксируется у подложки. При удалении от подложки относительное содержание атомов бора существенным образом снижается, преобладающими химическими элементами покрытия становятся атомы металлов (Al, Mg, Ti). Объясняя данный факт, можно предположить, что это обусловлено неоднородностью процесса распыления мишени, а именно, в первую очередь распыляется бор, что приводит к обеднению мишени атомами бора и формированию слоя, прилегающего к подложке, содержащего практически 100 ат. % бора.

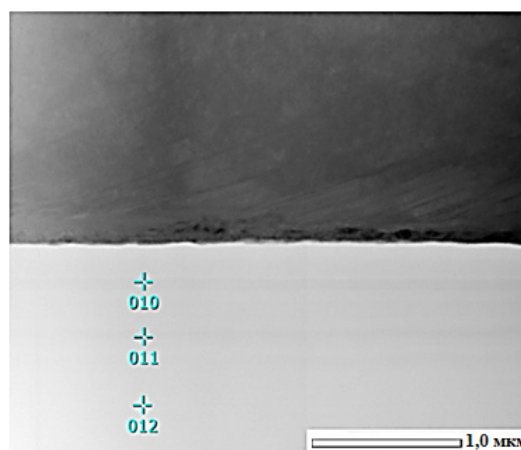


Рис.1. STEM изображение участка системы «покрытие/подложка». Обозначены места определения элементного состава покрытия

Fig.1. STEM image of a section of the «coating/substrate» system. The places for determining the elemental composition of the coating are indicated

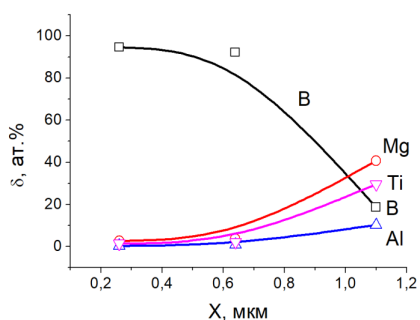


Рис.2. Зависимость элементного состава покрытия от расстояния от подложки

Fig.2. Dependence of the elemental composition of the coating on the distance from the substrate

Исследования, выполненные методом картирования (рис.3), подтверждают неоднородное распределение химических элементов в сформированном покрытии.

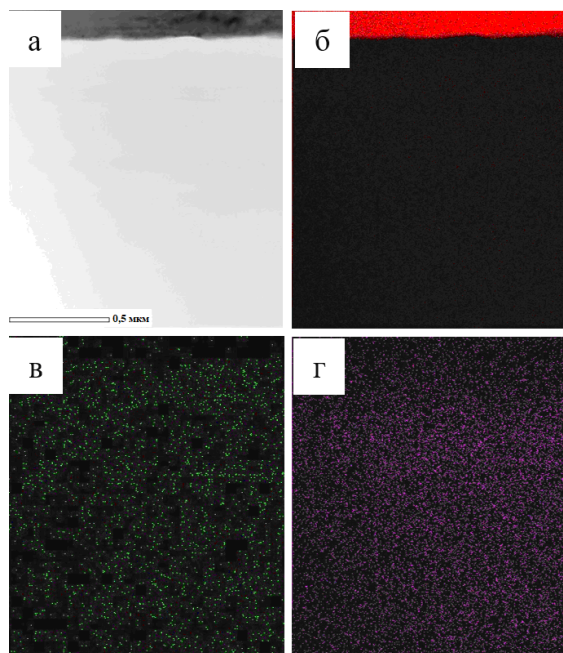


Рис.3. STEM изображение участка системы «покрытие/подложка» (а); б-г – изображение участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов железа (б), бора (в) и магния (г)

Fig.3. STEM image of a section of the «coating/substrate» system (a); b-d – image of the area (a), obtained in the characteristic X-ray radiation of iron (b), boron (c) and magnesium (d) atoms

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что микроэлектроннограмма (рис.4б), полученная с покрытия (рис.4а), содержит два диффузных гало, что характерно для аморфного материала.

Используя методы высокого разрешения, было установлено, что исследуемое покрытие следует отнести к аморфно-кристаллическим материалам, т.к. оно содержит области размерами (3-5) нм, в которых выявляются атомные ряды, т.е. области, имеющие кристаллическую структуру (рис.5).

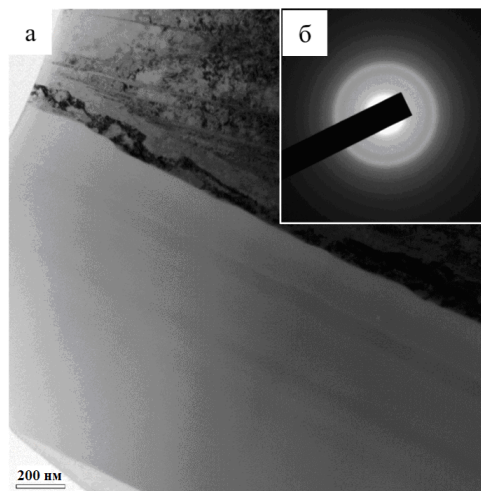


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение структуры борсодержащего покрытия, сформированного на ВЭС; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма

Fig.4. Electron microscopic image of the structure of the boron-containing coating formed at the HEA; a – bright field; b – microelectron diffraction pattern

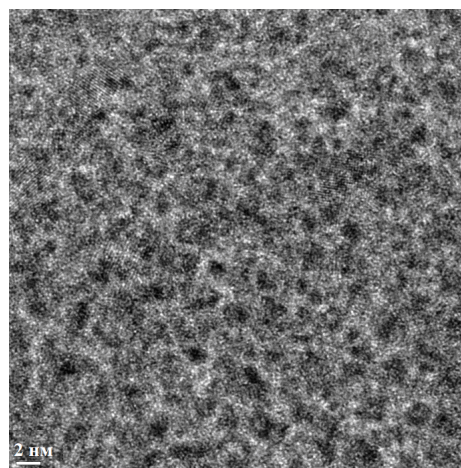


Рис.5. Электронно-микроскопическое изображение высокого разрешения участка борсодержащего покрытия, сформированного на ВЭС

Fig.5. High-resolution electron microscopic image of a section of a boron-containing coating formed at a HEA

Микроэлектроннограммы, полученные с областей фольги, обладающих кристаллической решеткой, позволили выявить рефлексы алю-

миния, бориды титана состава TiB и металллада состава $Ti_2Mg_3Al_{18}$.

Формирование покрытия сопровождается легированием поверхностного слоя подложки атомами бора. Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм выявлено образование наноразмерных (5-8 нм) частиц боридов железа состава Fe_3B (рис.6). Следует отметить, что методика нанесения покрытия позволяет формировать в поверхностном слое подложки субмикронанокристаллическую структуру с размером кристаллитов (25-40) нм (рис.6а, в).

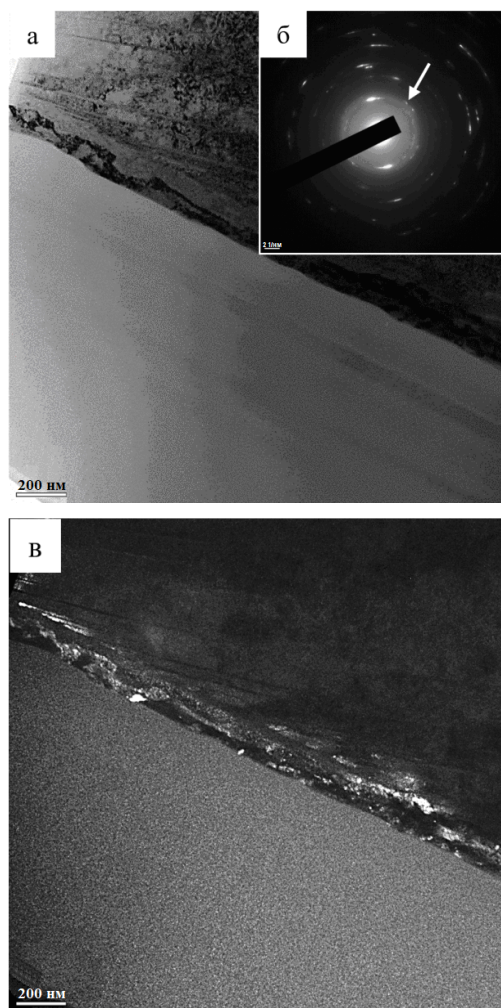


Рис.6. Электронно-микроскопическое изображение системы «покрытие/подложка»: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма (стрелкой указаны рефлексы, в которых получено темное поле), в – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах $[131]Fe_3B+[002]VЭС$

Fig.6. Electron microscopic image of the “coating/substrate” system: а – bright field; б – dark field obtained in closely spaced $[131]Fe_3B+[002]VЭС$ reflections; (с) microelectron diffraction pattern, the arrow indicates the reflections in which the dark field was obtained

Выполнены механические испытания и выявлено, что твердость покрытия $H = 11,0$ ГПа; модуль Юнга $E = 185$ ГПа; $H/E = 0,059$, что характерно для нанокристаллических материалов [15]. Осуществлены трибологические испытания. Показано, что параметр износа (величина, обратная износостойкости материала) $k = 4 \cdot 10^{-7}$ $mm^3/N \cdot m$; коэффициент трения $\mu = 0,12$. Для подложки без покрытия $H = 2,1$ ГПа; $k = 2,9 \cdot 10^{-4}$ $mm^3/N \cdot m$; $\mu = 0,62$. Сопоставляя результаты механических и трибологических испытаний ВЭС в исходном состоянии и после напыления борсодержащего покрытия, можно выявить многократное увеличение твердости, износостойкости и снижение коэффициента трения, имеющие место при формировании борсодержащего покрытия.

Заключение

Комбинированным ионно-плазменным методом на поверхности образцов высокоэнтропийного сплава состава $CoFeCrMnNi$ сформированы борсодержащие покрытия элементного состава $Al-Mg-Ti-B$ толщиной 1, 3 и 5 мкм. Установлено, что покрытия имеют аморфно-кристаллическую структуру с размером кристаллитов (3-5) нм. Анализ микроэлектроннограмм, полученных с областей кристаллической структуры, выявил рефлексы алюминия, боридов титана состава TiB и металллада $Ti_2Mg_3Al_{18}$. Показано, что использованная в работе схема напыления покрытия приводит к формированию в подложке тонкого (100-150 нм) поверхностного слоя с размером кристаллитов (25-40) нм, упрочненного боридом железа состава Fe_3B . Выявлено, что твердость покрытия $H = 11,0$ ГПа; модуль Юнга $E = 185$ ГПа; $H/E = 0,059$, что характерно для нанокристаллических материалов. Показано, что параметр износа $k = 4 \cdot 10^{-7}$ $mm^3/N \cdot m$; коэффициент трения $\mu = 0,12$. Сопоставляя результаты механических и трибологических испытаний ВЭС в исходном состоянии ($H = 2,1$ ГПа; $k = 2,9 \cdot 10^{-4}$ $mm^3/N \cdot m$; $\mu = 0,62$) и после напыления борсодержащего покрытия, можно выявить многократное увеличение твердости, износостойкости и снижение коэффициента трения, имеющие место при формировании системы «покрытие/подложка».

Список литературы

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. V. 375–377. P. 213–218.
2. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T., Tsau C.-Y., Chang S. Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. V. 6, N 5. P. 299–303.
3. Ворошнин Л.Г., Лабунец В.Ф., Киндрачук М.В. Износостойкие боридные покрытия. Киев: Техника, 1989. 158 с.
4. Goncharov A., Yunda A., Kolinko I., Maksakova O.V. Structural regularities of the formation of nitride and boride coatings based on transition metals // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2023. V. 27, N 1. P. 31–52.
5. Корнопольцев В.Н., Лысых С.А., Милов А.С. Повышение пластичности боридного покрытия на низкоуглеродистой стали // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 4. С. 546–553.
6. Лыгденев Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 И 5ХНВ // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9, № 4–2. С. 681–689.
7. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденев Б.Д., Земляков С.А., Долгоров А.А. Структура и свойства упрочненных бором и бором совместно с титаном поверхности штамповых сталей 5ХНВ и 5Х2НМВФ // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2010. Т. 7, № 1. С. 27–31.
8. Иванов Ю.Ф., Юшков Г.Ю. Структура и свойства покрытия бора, нанесенного методом магнетронного распыления и модифицированного электронным пучком // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022. Т. 19, № 4. С. 539–545.
9. Pascual E., Martínez E., Esteve J., Lousa A. Boron carbide thin films deposited by tuned-substrate RF magnetron sputtering // *Diamond and Related Materials*. 1999. V. 8, N 2–5. P. 402–405.
10. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. Москва: Металлургия, 1978. 239 с.
11. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Семин А.П. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2022. 230 с.
12. Devyatkov V.N., Ivanov Yu.F., Krysina O.V., Koval N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering // *Vacuum*. 2017. V. 143. P. 464–472.
13. Nikitin P., Zhukov I., Tkachev D., Abzaev Yu., Marchenko E., Vorozhtsov A. Experimental and Theoretical Study of Ultra-Hard AlMgB₁₄-TiB₂ Composites: Structure, Hardness and Self-Lubricity // *Materials*. 2022. V. 15, N. 23. P. 8450.
14. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology // *Journal of Materials Research*. 2004. V. 19, N 1. P. 3–20.
15. Горбань В.Ф., Андреев А.А., Шагинян Л.Р., Фирстов С.А., Карпец М.В., Даниленко Н.И. Высокоэнтропийные покрытия – структура и свойства // *Сверхтвердые материалы*. 2018. Т. 18, № 2. С. 19–36.

Информация об авторах

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

В. В. Шугуров – научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

И. И. Ажажа – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

Е. А. Петрикова – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

О. С. Толкачев – младший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН.

References

1. Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P. & Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, (375–377), 213–218.

2. Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T., Tsau, C. Y. & Chang, S.

- (2004). Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303.
3. Voroshnin, L. G., Labunets, V. F. & Kindrachuk, M. V. (1989). Wear-resistant boride coatings. Kyiv: Technique. P. 158. (In Russ.).
 4. Goncharov, A., Yunda, A., Kolinko, I. & Maksakova, O. V. (2023). Structural regularities of the formation of nitride and boride coatings based on transition metals. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Temperature Plasma Processes*, 27(1), 31–52.
 5. Kornopol'tsev, V. N., Lysykh, S. A. & Milonov, A. S. (2022). Improving the ductility of a boride coating on mild steel. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(4), 546–553. (In Russ.).
 6. Lygdenov, B. D., Garmayeva, I. A., Popova, N. A., Kozlov, E. V., Gur'yev, A. M. & Ivanov, S. G. (2012). Investigation of the phase composition and defective state of gradient structures of borated steels 20L, 45, 55, and 5KhNV. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 9(4–2), 681–689. (In Russ.).
 7. Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G., Gur'yev, M. A., Ivanov, A. G., Lygdenov, B. D., Zemlyakov, S. A. & Dolgorov, A. A. (2010). Structure and properties of surfaces of 5KhNV and 5Kh2NMVF stamp steels hardened with boron and boron together with titanium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 7(1), 27–31. (In Russ.).
 8. Ivanov, Yu. F. & Yushkov, G. Yu. (2022). Structure and properties of a boron coating deposited by magnetron sputtering and modified by an electron beam. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(4), 539–545. (In Russ.).
 9. Pascual, E., Martínez, E., Esteve, J. & Lousa, A. (1999). Boron carbide thin films deposited by tuned-substrate RF magnetron sputtering. *Diamond and Related Materials*, 8(2-5), 402–405.
 10. Voroshnin, L. G. & Lyakhovich, L. S. Steel boriding. Moscow: Metallurgy. P. 239. (In Russ.).
 11. Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shlyarova, Yu. A. & Semin, A. P. (2022). Structure and properties of high-entropy alloys. Novokuznetsk: SibGIU Publishing House. P. 230. (In Russ.).
 12. Devyatkov, V. N., Ivanov, Yu. F., Krysina, O. V., Koval, N. N., Petrikova, E. A. & Shugurov, V. V. (2017). Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. *Vacuum*, 143, 464–472.
 13. Nikitin, P., Zhukov, I., Tkachev, D., Abzaev, Yu., Marchenko, E. & Vorozhtsov, A. (2022). Experimental and Theoretical Study of Ultra-Hard AlMgB₁₄-TiB₂ Composites: Structure, Hardness and Self-Lubricity. *Materials*, 15(23), 8450.
 14. Oliver, W. C. & Pharr, G. M. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 19(1), 3–20.
 15. Gorban', V. F., Andreyev, A. A., Shaginyan, L. R., Firstov, S. A., Karpets, M. V. & Danilenko, N. I. (2018). High-entropy coatings – structure and properties. *Superhard materials*, 18(2), 19–36. (In Russ.).

Information about the authors

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

V. V. Shugurov – Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

I. I. Azhazha – Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

E. A. Petrikova – Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

O. S. Tolkahev – Junior Researcher, Institute of High Current Electronics SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 31.07.2023.

The article was received by the editorial board on 20 June 23; approved after reviewing 18 July 23; accepted for publication 31 July 23.