

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.625:539.25:539.651

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.001

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ КОНТАКТА ПОДЛОЖКА-ПОКРЫТИЕ, ПОДВЕРГНУТОЙ ОБЛУЧЕНИЮ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Юрий Федорович Иванов¹, Михаил Олегович Ефимов², Виктор Евгеньевич Громов^{3†},
Юлия Андреевна Шлярова⁴, Сергей Валерьевич Коновалов⁵, Ирина Алексеевна Панченко⁶

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

^{2, 3, 4, 5, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654006, Новокузнецк, Россия

¹ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

² moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>

³ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

⁴ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁵ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁶ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

Аннотация. Используя метод проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM-wire arc additive manufacturing) на подложке из алюминиевого сплава 5083, было сформировано покрытие из высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Mn–Cr–Fe–Co–Ni неэквивалентного состава. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ структуры, фазового и элементного состава зоны контакта после облучения низкоэнергетическими электронными пучками с параметрами: плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см², длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 Гц. Выявлено образование многофазной многоэлементной субмикронанокристаллической структуры, сформированной преимущественно в подложке, которая имеет более низкую температуру плавления по сравнению с ВЭС. Установлено, что контактные слои, примыкающие к подложке и покрытию, имеют структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. В слое, примыкающем к подложке, ячейки образованы твердым раствором магния в алюминии. По границам ячеек выявлены прослойки второй фазы, обогащенные атомами покрытия и подложки. В слое, примыкающем к покрытию, ячейки сформированы сплавом состава 0,17Mg–20,3Al–4,3Cr–16,7Fe–9,3Co–49,2Ni. По границам ячеек выявлены прослойки второй фазы, обогащенные преимущественно магнием и атомами покрытия. Центральная область зоны контакта толщиной ~ 1700 мкм сформирована кристаллитами пластинчатой формы, ее основным элементом является алюминий (~ 77 ат. %).

Ключевые слова: зона контакта, структура, высокоэнтропийный сплав MnFeCoCrNi, метод WAAM (проволоочно-дугового аддитивного производства), сплав алюминия 5083, импульсный электронный пучок, элементный и фазовый состав.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-19-00452) – формирование образцов системы «покрытие (ВЭС)/сплав 5083) подложка» с помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства, исследование структуры зоны контакта методами просвечивающей электронной микроскопии и за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – облучение системы «покрытие (ВЭС)/(сплав 5083) подложка» импульсным электронным пучком, исследование структуры облученного слоя методами сканирующей электронной микроскопии.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Ефимов М.О., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Панченко И.А. Электронно-микроскопическое исследование структуры зоны контакта подложка-покрытие, подвергнутой облучению импульсным электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 1. С. 9–16. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.001.

Original article

ELECTRON-MICROSCOPIC INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF A SUBSTRATE-COATING CONTACT ZONE EXPOSED TO IRRADIATION WITH A PULSE ELECTRON BEAM

Yurii F. Ivanov¹, Mikhail O. Efimov², Victor E. Gromov^{3†}, Yulia A. Shliarova⁴,
Sergey V. Konovalov⁵, Irina A. Panchenko⁶

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

^{2,3,4,5,6}Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

¹yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

²moefimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4890-3730>

³gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

⁴rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁵konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁶i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

Abstract. Using a WAAM-wire arc additive manufacturing method, a non-equiatomic Mn–Cr–Fe–Co–Ni high-entropy alloy (HEA) coating was formed on a 5083 aluminum alloy substrate. Using scanning and transmission electron microscopy, the analysis of the structure, phase and elemental composition of the contact zone after irradiation with low-energy electron beams with the following parameters: electron beam energy density 30 J/cm², pulse duration 200 μs, number of pulses 3, pulse repetition rate 0.3 Hz was performed. The formation of a multiphase multi-element submicron-nanocrystal structure, formed mainly in the substrate, which has a lower melting temperature compared to HEA, has been revealed. It has been established that the contact layers adjacent to the substrate and coating have the structure of high-speed cellular crystallization. In the layer adjacent to the substrate, the cells are formed by a solid solution of magnesium in aluminum. Interlayers of the second phase, enriched by atoms of the coating and substrate, were revealed along the cell boundaries. In the layer adjacent to the coating, the cells are formed by an alloy of composition 0.17Mg–20.3Al–4.3Cr–16.7Fe–9.3Co–49.2Ni. Interlayers of the second phase, enriched mainly in magnesium and coating atoms, were revealed along the cell boundaries. The central region of the contact zone ~ 1700 μm thick is formed by lamellar crystallites; its main element is aluminum (≈ 77 at. %).

Keywords: contact zone, structure, high-entropy MnFeCoCrNi alloy, WAAM method (wire-arc additive manufacturing), 5083 aluminum alloy, pulsed electron beam, elemental and phase composition.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452) – formation of samples of the «coating (HEA)/(5083) substrate» system using wire arc additive technology, study of the structure of the contact zone by transmission electron microscopy and at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – irradiation of the «coating (HEA)/(5083) substrate» system with a pulsed electron beam, studying the structure of the irradiated layer using scanning electron microscopy.

For citation: Ivanov, Yu. F., Efimov, M. O., Gromov, V. E., Shliarova, Yu. A., Konovalov, S. V. & Panchenko, I. A. (2024). Electron-microscopic investigation of the structure of a substrate-coating contact zone exposed to irradiation with a pulse electron beam. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 9–16. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.001.

Введение

Разработка и создание новых технологий и материалов на их основе, обладающих комплексом высоких функциональных свойств, является одной из важнейших задач современного физического материаловедения. Традиционный подход в создании таких материалов состоит в выборе одного основного элемента в качестве матрицы, легируемого для получения тех или иных свойств.

В последние два десятилетия разработан подход к созданию многокомпонентных сплавов, имеющих в качестве матрицы 5 и более элементов в концентрации 5-35 % [1-3]. Особенностью таких сплавов является то, что они имеют выигрыш в энтропии смешения, что способствует образованию простых твердых растворов. Первыми из таких материалов были исследованы системы MnCoCrFeNi, AlCoCrFeNi и другие [4]. Было предложено называть сплавы, состоящие из 5 и более элементов примерно равных эквивалентных концентраций

высокоэнтропийными сплавами (ВЭС). ВЭС наряду с параметрами, типичными для металлических сплавов, обладают уникальными характеристиками и свойствами, такими как износостойкость, коррозионная стойкость, высокие пластические и прочностные характеристики в области высоких и криогенных температур и др. [5-8]. В монографиях и обзорах [3, 4, 8-12] выполнен анализ структурно-фазовых состояний, свойств, стабильности, моделей, методов получения и областей применения ВЭС. Очевидно, что появление ВЭС можно рассматривать как существенный прогресс в развитии металлических материалов.

Присутствие нескольких составляющих элементов в составе ВЭС позволяет получить разнообразные покрытия на их основе с требуемыми физико-химическими свойствами [12] и значительно расширить области их применения, в том числе и за счет удешевления изделий и конструкций.

В целях улучшения свойств поверхности ВЭС подвергают различным видам поверхностной обработки [13-15]. Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка. Электронно-пучковая обработка обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10^6 К/с) до заданных температур и охлаждения поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями 10^4 - 10^9 К/с, в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния [16, 17].

В работах [18-22] выполнен анализ структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС CrMnFeCoNi и CoCrFeNiAl неэквипотенциальных составов, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) и подвергнутых электронно-пучковой обработке (ЭПО) с параметрами: плотность энергии пучка электронов 10-30 Дж/см², длительность импульса 50-200 мкс, частота 0,3 с⁻¹, число импульсов – 3. Показано, что ЭПО, приводящая к высокоскоростной кристаллизации расплавленного поверхностного слоя, сопровождается формированием нанокристаллической столбчатой структуры, увеличивает прочностные и пластические свойства ВЭС, гомогенизирует материал.

Облучение сплава Кантора CrMnFeCoNi электронными пучками не приводит к изменению его элементного состава, однако существенным образом преобразует его дефектную субструктуру. Во-первых, приводит к существенному (в 6 раз, от 20 до 120 мкм) увеличению среднего размера зерна. Во-вторых, формированию в поверхностном слое толщиной \approx 5 мкм структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации с размером ячеек (400-550) нм. В-третьих, формированию текстуры высокоскоростной кристаллизации расплавленного поверхностного слоя.

Целью настоящей работы является анализ структуры, элементного и фазового состава зоны контакта системы ВЭС (покрытие) – сплав 5083 (подложка), подвергнутой обработке импульсным электронным пучком.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использована система «покрытие/подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквипотенциального элементного состава Fe-Cr-Co-Ni-Mn (сплав Кантора), который был сформирован на подложке методом WAAM [4]. Подложкой являлся сплав на основе алюминия 5083. Облучение зоны контакта системы «покрытие/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов $U = 18$ кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = 30$ Дж/см², длительность импульса пучка электронов $t = 200$ мкс, количество импульсов $N = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹. Облучение осуществляли в вакууме при давлении остаточного газа (аргон) в камере установки $p = 0,02$ Па. Исследование элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры зоны контакта покрытия и подложки осуществляли методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100) электронной микроскопии [23-25]. Фольги для просвечивающего электронного микроскопа изготавливали ионным утонением (установка Ion Slicer EM-091001S, утонение осуществляется ионами аргона) пластинок, вырезанных из массивных образцов на установке Isomet Low Speed Saw перпендикулярно поверхности наплавленного слоя ВЭС из области границы раздела подложки и наплавки, что по-

зволяло проследить изменение структуры и фазового состава материала по мере удаления от зоны контакта покрытия с подложкой.

Результаты исследования и их обсуждение

Из приведенного на рис.1а электронно-микроскопического изображения поперечного сечения зоны контакта «покрытие-подложка» отчетливо видно, что формируется протяженный слой толщиной до 700 мкм, характеризующийся наличием микротрещин, расположенных вдоль границы контакта со стороны подложки. Контактный слой не имеет ярко выраженной границы, что свидетельствует о высоком уровне сплавления подложки и наплавленного материала.

Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлена взаимная диффузия атомов

подложки и покрытия (табл.1). Отчетливо видно, что приконтактный слой покрытия легирован атомами алюминия (рис.1а, г, область анализа А), а приконтактный слой подложки – элементами ВЭС (рис.1а, в, область анализа Б). При этом алюминий в существенно большей степени легирует покрытие. Последнее связано, очевидно, с низкой температурой плавления алюминия по сравнению с ВЭС. Изменение элементного состава контактного слоя системы «пленка/подложка» при переходе от металла наплавки к металлу подложки приведено на рис.1б. Он демонстрирует плавное изменение элементного состава зоны контакта. Это может свидетельствовать об отсутствии вихревых потоков при использованном способе наплавки покрытия на подложку и последующем облучении импульсным электронным пучком.

Таблица 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава покрытия в области «А» и подложки в области «Б»

Table 1. Results of X-ray microanalysis of the elemental composition of the coating in the area «A» and the substrate in the area «B»

Элемент, ат. %	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Область А	5,7	92,4	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3
Область Б	0,0	12,3	12,6	2,7	32,5	25,3	14,6

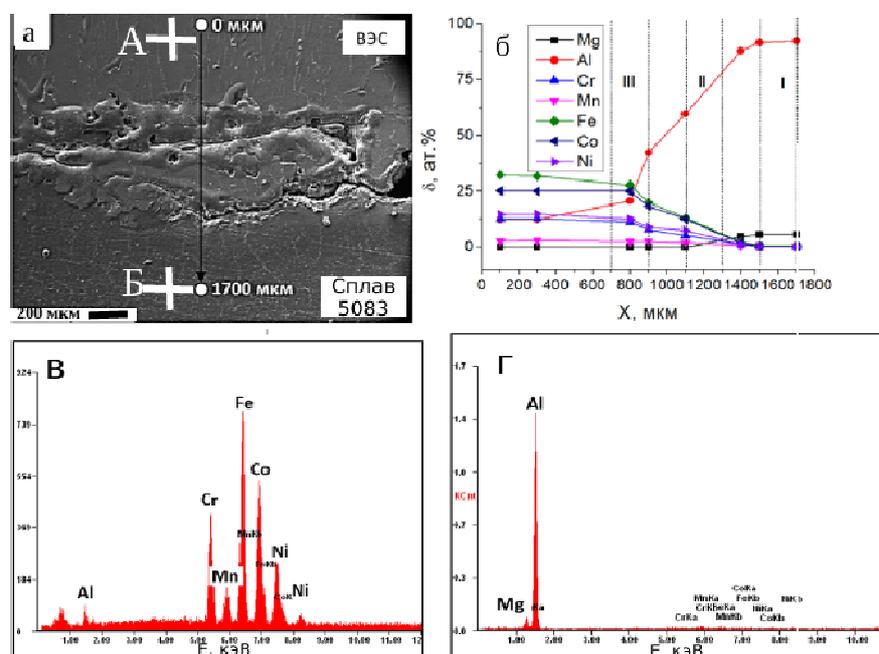


Рис.1. Структура области контакта системы «проволока-подложка» (а) и зависимости концентрации легирующих элементов зоны (б) вдоль линии 0-1700 мкм, приведенные на а); в, г – энергетические спектры, полученные в области Б и А

Fig.1. The structure of the contact area of the «wire-substrate» system (a) and the dependences of the concentration of alloying elements of the zone (b) along the line 0-1700 μm, shown on a); c, d – energy spectra obtained in region B and A

Можно предположить, что взаимное легирование покрытия и подложки в условиях облучения импульсным электронным пучком приведет к существенному изменению фазового состава зоны контакта. Исследования элементного и фазового состава, выполненные методами тонких фольг, осуществляли соответственно слоям, указанным на рис.1б.

Установлено, что структура слоя I сформирована ячейками высокоскоростной кристаллизации. По мере удаления от зоны контакта с покрытием ячеистая структура вырождается в слоистую. Объем ячеек является твердым раствором магния в алюминии, что соответствует сплаву 5083. Прослойки второй фазы, расположенные по границам ячеек, обогащены атомами, формирующими наплавку и подложку.

Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм установлено, что объем ячеек высокоскоростной кристаллизации сформирован твердым раствором на основе алюминия. Ячейки кристаллизации разделены прослойками фазы Mg_2Si .

Слой II имеет пластинчатую структуру и образован, очевидно, в результате эвтектиче-

ского превращения, имеющего место при высокоскоростной термической обработке, инициированной импульсным электронным пучком. Методами микрорентгеноспектрального анализа фольги показано, что основным элементом данного слоя является алюминий (76,8 ат. %), в меньшем количестве присутствуют Mg (4,1 ат. %), Cr (2,2 ат. %), Mn (0,3 ат. %), Fe (4,9 ат. %), Co (1,6 ат. %), Ni (10,1 ат. %).

Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм установлено, что данный слой сформирован пластинами следующих фаз: $Al_{13}Fe_4$, Cr-Ni-Fe и Al_6Fe .

Слой III, как и слой I, сформирован ячейками высокоскоростной кристаллизации (рис.2). Объем ячеек образован сплавом состава 0,17Mg-20,3Al-4,3Cr-16,7Fe-9,3Co-49,2Ni, что соответствует ВЭС, легированному элементами подложки (сплав 5083). Прослойки второй фазы, расположенные по границам ячеек, также сформированы элементами, формирующими наплавку и подложку (41,5Mg-10,9Al-9,0Cr-1,0Mn-15,2Fe-4,1Co-18,4Ni).

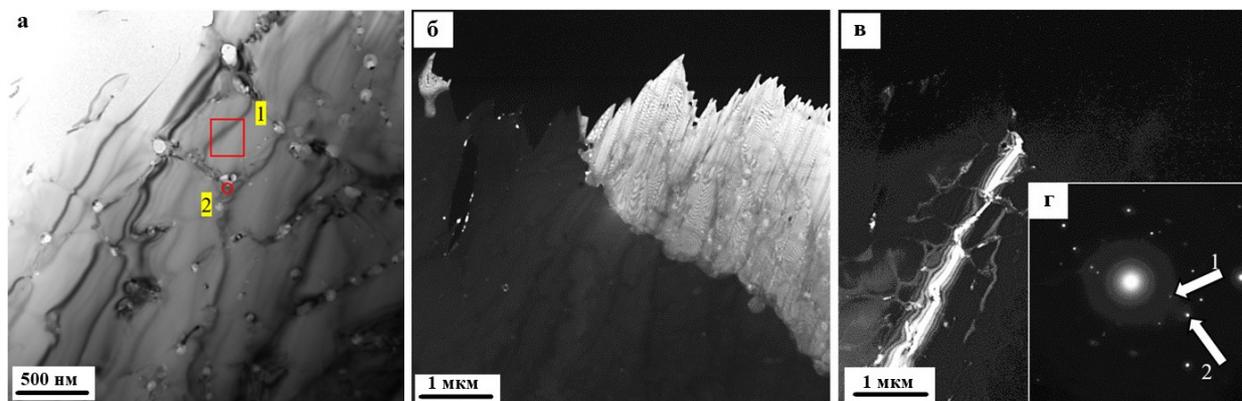


Рис.2. Структура слоя III системы «наплавка/подложка» после электронно-пучковой обработки. а) светлопольное изображение; б, в) темнопольные изображения и микроэлектроннограмма (г), полученные с участка фольги (а). Изображение (б) получено в рефлексе $[210]Cr-Ni-Fe$

Fig.2. The structure of layer III of the «surfacing/substrate» system after electron-beam processing. a) bright field image; b, c) dark-field images and microelectron diffraction pattern (d) obtained from the foil section (a). Image (b) was obtained in the reflection $[210]Cr-Ni-Fe$

Закключение

Используя метод проволочно-дугового аддитивного производства на сплаве 5083, сформировано покрытие ВЭС элементного состава Fe-Cr-Co-Ni-Mn. Осуществлено облучение зоны контакта системы «покрытие/подложка» интенсивным импульсным электронным пуч-

ком и выполнены исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры сплава, формирующегося в зоне контакта. Выявлено взаимное легирование покрытия и подложки в слое толщиной ≈ 1700 мкм. Показано, что высокоскоростное охлаждение зоны контакта системы «покрытие/подложка» привело к формированию мно-

гоэлементной, многофазной субмикро- нанокристаллической структуры. Установлено, что контактный слой, примыкающий к подложке, имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Объем ячеек сформирован твердым раствором магния в алюминии, что соответствует сплаву 5083; по границам ячеек располагаются прослойки второй фазы, обогащенные атомами, формирующими покрытие и подложку. Центральная область зоны контакта сформирована кристаллитами пластинчатой формы, что может указывать на их эвтектическую природу образования. Основным химическим элементом данной области является алюминий (≈ 77 ат. %). Контактный слой, примыкающий к покрытию, имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Объем ячеек сформирован сплавом состава $0,17\text{Mg}-20,3\text{Al}-4,3\text{Cr}-16,7\text{Fe}-9,3\text{Co}-49,2\text{Ni}$, что соответствует ВЭС, легированному элементами подложки; прослойки второй фазы, расположенные по границам ячеек, обогащены магнием и, в меньшей степени, атомами, формирующими покрытие.

Список литературы

- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. V. 188. P. 435–474.
- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2021. Т. 64, № 4. С. 249–258.
- Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. С. 807–841.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Structure and properties of high-entropy alloys. *Ru. Science*, 2022. 159 p.
- 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 out-comes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. V. 6, N 5. P. 299–303.
- Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys // *JOM*. 2012. V. 64, N 7. P. 830–838.
- Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie. Science des Materiaux*. 2006. V. 31, N 6. P. 633–648.
- Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM*. 2013. V. 65, N 12. P. 1759–1771.
- Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 631–632. P. 227–232.
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. V. 61. P. 1–93.
- Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys // *Intermetallics*. 2013. V. 39. P. 74–78.
- 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. Т. 83, № 11. С. 1027–1061.
- Xianghan G., Sheng Z. Laser-irradiation-induced dynamically recrystallized microstructure and properties of supersonic-particle-deposited Ni-Fe-Cr-Nb-Ti-Al high-entropy alloy coating // *Mater. Characterization*. 2022. V. 183. Art. 111600.
- Guo J., Goh M., Zhu Z, Lee X., Nai M.L.S., Wei J. On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials and Design*. 2018. V. 153. P. 211–220.
- Lindner T., Lobel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding // *Surface and Coatings Technology*. 2019. V. 37. P. 389–394.
- Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies // *Progress in Physics of metals*. 2020. V. 21, N 3. P. 345–362.
- Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Семин А.П. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. 230 с.
- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron

beam // *Journal Mater. Res. and Techn.* 2022. V. 19. P. 4258–4269.

19. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi HEA irradiated by pulsed electron beam // *Metals*. 2021. V. 11(8). 1228.

20. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022. Т. 65, № 6. С. 427–433.

21. Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Воробьев С.В. Влияние электронно-пучковой обработки на характер разрушения высокоэнтропийного Cr–Mn–Fe–Co–Ni сплава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 5(803). С. 35–39.

22. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Osintsev K.A. Effect of electron beam treatment on the structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. V. 22. P. 72–76.

23. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel, 2016. 196 p.

24. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York, 2014. 717 p.

25. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin, 2016. 518 p.

Информация об авторах

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

М. О. Ефимов – инженер Управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующая лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. George, E. P., Curtin, W. A. & Tasan, C. C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*, 188, 435–474.

2. Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Kononov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Panchenko, I. A. (2021). Vysokoentropiynuye splavy: struktura, mekhanicheskiye svoystva, mekhanizmy deformatsii i primeneniye. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 64(4), 249–258. (In Russ.).

3. Rogachev, A. S. (2020). Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropiynykh splavov. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 121, 807–841. (In Russ.).

4. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shlyarova, Yu. A. & Panchenko, I. A. (2022). Structure and properties of high-entropy alloys. *Ru. Science*. P. 159.

5. Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H. & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and out-comes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303.

6. Zhang, Y., Yang, X. & Liaw, P. K. (2012). Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys. *JOM*, 64(7), 830–838.

7. Yeh, J. W. (2006). Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie. Science des Materiaux*, 31(6), 633–648.

8. Yeh, J. W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*, 65(12), 1759–1771.

9. Zhang, L. S., Ma, G.-L., Fu, L.-C. & Tian, J.-Y. (2013). Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*, 631–632, 227–232.

10. Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1–93.

11. Gali, A. & George, E. P. (2013). Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*, 39, 74–78.

12. Pogrebnyak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Yakushchenko, I. V. & Beresnev, V. M. (2014). Struktura i svoystva vysokoentropiynykh splavov i nitridnykh pokrytiy na ikh osnove. *Uspekhi khimii*, 83(11), 1027–1061. (In Russ.).
13. Xianghan, G. & Sheng, Z. (2022). Laser-irradiation-induced dynamically recrystallized microstructure and properties of supersonic-particle-deposited Ni-Fe-Cr-Nb-Ti-Al high-entropy alloy coating ting. *Mater. Characterization*, 183, Art. 111600.
14. Guo, J., Goh, M., Zhu, Z, Lee, X., Nai, M. L. S. & Wei, J. (2018). On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials and Design*, 153, 211–220.
15. Lindner, T., Lobel, M., Sattler, B. & Lampke, T. (2019). Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding. *Surface and Coatings Technology*, 37, 389–394.
16. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Zagulyaev, D. V., Kononov, S. V., Rubannikova, Yu. A. & Semin, A. P. (2020). Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*, 21(3), 345–362.
17. Gromov, V. E., Kononov, S. V., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shlyarova, Yu. A. & Semin, A. P. (2022). Struktura i svoystva vysokoentropiynykh splavov. Novokuznetsk: Sibirskiy gosudarstvennyy industrial'nyy universitet. P. 230. (In Russ.).
18. Gromov, V. E., Kononov, S. V., Ivanov, Yu. F., Shlyarova, Yu. A., Vorobyov, S. V. & Semin, A. P. (2022). Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal Mater. Res. and Techn.*, 19, 4258–4269.
19. Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Kononov, S. V., Panchenko, I. A. & Vorobyov, S. V. (2021). Evolution of structure in AlCoCrFeNi HEA irradiated by pulsed electron beam. *Metals*, 11(8), 1228.
20. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Vorobyev, S. V. & Panchenko, I. A. (2022). Fraktografiya poverkhnosti razrusheniya vysokoentropiynogo splava CrMnFeCoNi posle elektronno-puchkovoy obrabotki. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 65(6), 427–433. (In Russ.).
21. Gromov, V. E., Shlyarova, Yu. A., Ivanov, Yu. F., Kononov, S. V. & Vorobyev, S. V. (2022). Vliyaniye elektronno-puchkovoy obrabotki na kharakter razrusheniye vysokoentropiynogo Cr-Mn-Fe-Co-Ni splava. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*, 5(803), 35–39. (In Russ.).
22. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Kononov, S. V. & Osintsev, K. A. (2021). Effect of electron beam treatment on the structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *CIS Iron and Steel Review*, 22, 72–76.
23. Egerton, F. R. (2016). Physical Principles of Electron Microscopy. Basel. P. 196.
24. Kumar, C. S. S. R. (2014). Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York. P. 717.
25. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). Transmission Electron Microscopy. Berlin. P. 518.

Information about the authors

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

M. O. Efimov – Engineer, Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Yu. A. Shlyarova – PhD student, Department of Natural Sciences prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

S. V. Kononov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities of the Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 14.11.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 01.02.2024.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 23; approved after reviewing 17 Jan. 24; accepted for publication 01 Feb. 24.