

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.1811-1416.2023.02.001

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗОНЫ КОНТАКТА ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА AlFeCoCrNi НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ СПЛАВА 5083 ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Юрий Федорович Иванов¹, Михаил Олегович Ефимов², Виктор Евгеньевич Громов^{3†}, Сергей Валерьевич Коновалов⁴, Ирина Алексеевна Панченко⁵, Юлия Андреевна Шлярова⁶, Алексей Борисович Юрьев⁷

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

^{2, 3, 4, 5, 6, 7} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, 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 konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁵ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁶ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁷ rector@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

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) AlCrFeCoNi неэквивалентного состава (масс %: 15,64 Al; 22,31 Fe; 7,78 Co; 8,87 Cr; 44,57 Ni). Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выполнен анализ структуры, фазового и элементного состава, дефектной субструктуры зоны контакта после облучения низкоэнергетическими электронными пучками с параметрами: плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 , длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 Гц. Показано, что облучение приводит к фрагментации материала микротрещинами. Выявлено образование многофазной многоэлементной субмикро-нанокристаллической структуры, сформированной преимущественно в подложке, которая имеет более низкую температуру плавления по сравнению ВЭС. Микродифракционным анализом с применением метода темнопольного изображения показано формирование зерен Al_3Ni и твердого раствора на основе Al. В объеме зерен Al_3Ni присутствуют частицы фазы Fe_2Al_5 , размеры которых изменяются в пределах (35-70) нм. Установлено взаимное легирование покрытия и подложки. Дислокационная субструктура, формирование которой обусловлено термическими напряжениями при облучении электронными пучками, представлена сетками со скалярной плотностью дислокации $2,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Ключевые слова: зона контакта, высокоэнтропийный сплав AlFeCoCrNi , подложка, сплав 5083, электронные пучки, структура, фазовый состав.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 20-19-00452) – формирование образцов системы «покрытие (ВЭС)/(5058) 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)/(5083) подложка» импульсным электронным пучком, исследование структуры облученного слоя методами сканирующей электронной микроскопии.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Ефимов М.О., Громов В.Е., Коновалов С.В., Панченко И.А., Шлярова Ю.А., Юрьев А.Б. Электронно-микроскопический анализ зоны контакта покрытия из высокоэнтропийного сплава AlFeCoCrNi на подложке из сплава 5083 после облучения электронными пучками // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 2. С. 149–156. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.001.

Original article

ELECTRON-MICROSCOPIC ANALYSIS OF THE CONTACT ZONE OF A COATING FROM A HIGH-ENTROPY AlFeCoCrNi ALLOY ON A SUBSTRATE FROM 5083 ALLOY AFTER IRRADIATION WITH ELECTRON BEAMS**Yurii F. Ivanov¹, Mikhail O. Efimov², Victor E. Gromov^{3†}, Sergey V. Kononov⁴, Irina A. Panchenko⁵, Yulia A. Shliarova⁶, Alexey B. Yuriev⁷**¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskyy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia^{2,3,4,5,6,7} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia¹ 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 kononov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁵ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>⁶ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>⁷ rector@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9932-4755>

Abstract. Using the WAAM-Wire Arc Additive Manufacturing method on a 5083 aluminum alloy substrate a coating was formed from a high-entropy alloy (HEA) AlCrFeCoNi of a non-equiatomic composition (mass %: 15.64 Al; 22.31 Fe; 7.78 Co; 8.87 Cr; 44.57 Ni). Using scanning and transmission electron microscopy analysis of structure, phase and elemental composition, defective substructure of the contact zone was carried out 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. It is shown that irradiation leads to fragmentation of the material by microcracks. The formation of a multiphase, multielement submicron nanocrystalline structure, formed mainly in the substrate, which has a low melting temperature compared to HEA, was revealed. The microdiffraction analysis using the dark-field imaging method showed the formation of Al₃Ni grains and aluminum-based solid solution. In the volume of Al₃Ni grains, there are Fe₂Al₅ particles, the size of which varies within (35-70) nm. Mutual doping of the coating and substrate is established. The dislocation substructure formation, which is caused by thermal stresses during irradiation with electron beams, is represented by nets with a scalar dislocation density of 2.1 · 10¹⁰ cm⁻².

Keywords: contact zone, high-entropy AlFeCoCrNi alloy, substrate, 5083 alloy, electron beams, structure, 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., Kononov, S. V., Panchenko, I. A., Shliarova, Yu. A. & Yuriev, A. B. (2023). Electron-microscopic analysis of the contact zone of a coating from a high-entropy AlFeCoCrNi alloy on a substrate from 5083 alloy after irradiation with electron beams. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(2), 149–156. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.001.

Введение

В конце XX – начале XXI века появились первые исследования по созданию новых, так называемых высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС), состоящих из пяти и более элементов с концентрацией 5-35 % [1-4]. Такие материалы обладают необычными свойствами – износ- и коррозионной стойкостью, высокими механическими свойствами при повышенных и крио-

генных температурах, особыми магнитными и электрическими свойствами и т.п. [5-6]. В обзорных работах [7-11] проанализированы структурно фазовые состояния, дефектная субструктура, методы получения и возможные области применения наиболее перспективных ВЭС и отмечено, что они являются значительным шагом вперед в развитии современного физического материаловедения. По базам данных Scopus и Web of Science число публикаций

по ВЭС в XXI веке превысило 5000 [12]. Идёт процесс накопления информации о структуре, фазовом составе, дислокационной субструктуре, свойствах, стабильности, деформационном поведении, влиянии различных факторов, новых методов применения и обработки ВЭС [13]. Дальнейшее развитие этих направлений связывается с улучшением поверхностных свойств ВЭС различными видами обработки [14], наиболее перспективными из которых являются облучения низкоэнергетическими силовыми электронными пучками [15].

В процессе электронно-пучковой обработки (ЭПО) за очень короткий промежуток времени происходит высокоскоростная кристаллизация, формируется столбчатая нанокристаллическая структура, гомогенизация химического состава [16]. Для высокоэнтропийных сплавов $CoCrFeNiMn$ и $CoCrFeNiAl$, полученных по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства в атмосфере чистого азота, ЭПО сопровождается формированием градиентов микротвердости и элементного состава [17].

В настоящей работе проанализированы элементный и фазовый состав, дефектная субструктура зоны контакта системы «покрытие (ВЭС $AlCoCrFeNi$) – подложка (сплав 5083)» после ЭПО.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использованы образцы системы «покрытие/подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквивалентного элементного состава $Al-Fe-Cr-Co-Ni$, который был сформирован на подложке методом проволоочно-дугового аддитивного производства [3-4]. 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 микрорентгеноспек-

тральным анализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100) электронной микроскопии [18-20]. 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 позволяло проследить изменение структуры и фазового состава материала по мере удаления от зоны контакта покрытия с подложкой.

Результаты исследования и их обсуждение

Облучение импульсным электронным пучком высокоэнтропийного покрытия привело к фрагментации материала микротрещинами. Размеры фрагментов изменяются в широких пределах от 35 мкм до 150 мкм. На облученной поверхности обнаруживаются частицы глобулярной формы. Размеры частиц изменяются в пределах от 0,13 мкм до 1,1 мкм.

Методами микрорентгеноспектрального анализа поверхностного слоя покрытия, облученного импульсным электронным пучком, выявили существенное увеличение концентрации атомов алюминия. Используя методику микрорентгеноспектрального анализа «по точкам», было установлено, что частицы, выявленные на поверхности облученного покрытия, обогащены атомами алюминия. Результаты указывают на существенное (в 1,7 раза) превышение концентрации атомов алюминия в частицах относительно концентрации алюминия в среднем по материалу. Следовательно, облучение ВЭС импульсным электронным пучком сопровождается расслоением сплава по алюминию с образованием на поверхности облучения частиц, обогащенных данным элементом.

Вдоль границы соприкосновения покрытия и подложки наблюдаются продольные трещины, что указывает на высокий уровень внутренних напряжений, возникших в системе «покрытие/подложка», релаксация которых привела к формированию микротрещин не только в материале покрытия и подложки, но и вдоль границы их контакта. Анализ энергетических спектров, полученных с области поперечного сечения системы «покрытие-подложка», показывает, что основными элементами зоны контакта являются алюминий и кислород. Кислород распределен весьма неоднородно и форми-

рует включения неправильной формы, привязанные к микротрещинам.

Облучение системы «покрытие (ВЭС)/5083 подложка» импульсным электронным пучком приводит к существенному преобразованию

структуры подложки в зоне контакта с ВЭС. Во-первых, наблюдается формирование структуры игольчатого (пластинчатого) типа (рис.1а). Во-вторых, легирование подложки элементами ВЭС (рис.1б).

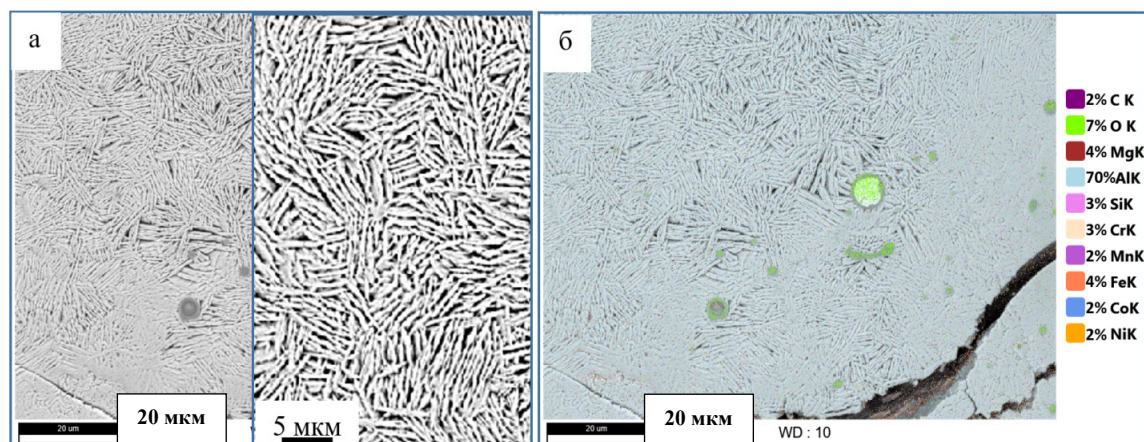


Рис.1. Структура поперечного шлифа сплава 5083 (подложка) в области контакта с ВЭС (а); б – карта распределения элементов данного участка образца (в таблице приведен элементный состав данного участка образца)

Fig.1. The structure of a transverse section of alloy 5083 (substrate) in the area of contact with the HEA (a); b – map of the distribution of elements of a given section of the sample (the table shows the elemental composition of this section of the sample)

Выполненные методами сканирующей электронной микроскопии исследования показали, что при выбранном в работе режиме облучения преобразования структуры, элементного и фазового состава протекают, преимущественно, в прилегающем к покрытию слое подложки, что обусловлено сравнительно низкой температурой плавления сплава 5083.

Детальный анализ морфологии, элементного и фазового состава подложки в зоне контак-

та с ВЭС, подвергнутой облучению импульсным электронным пучком, изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. На рис.2-рис.3 приведены характерные изображения структуры и результаты исследования элементного состава, полученные методами микрорентгеноспектрального анализа подложки в зоне контакта с покрытием (использован метод STEM анализа фольги).



Спектр	Элементный состав, ат.%						
	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Спектр 1	0.0	83.6		0.1	1.1	1.1	14.1
Спектр 2	0.0	85.7	9.6	1.2	1.0	0.3	2.2
Спектр 3	4.2	95.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Спектр 4	8.0	92.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Рис.2. ПЭМ изображение формирующейся области контакта сплава 5083 (подложка) с ВЭС (покрытие); в таблице приведен элементный состав данного участка фольги

Fig.2. TEM image of the emerging contact area of the 5083 alloy (substrate) with the HEA (coating); the table shows the elemental composition of this section of the foil

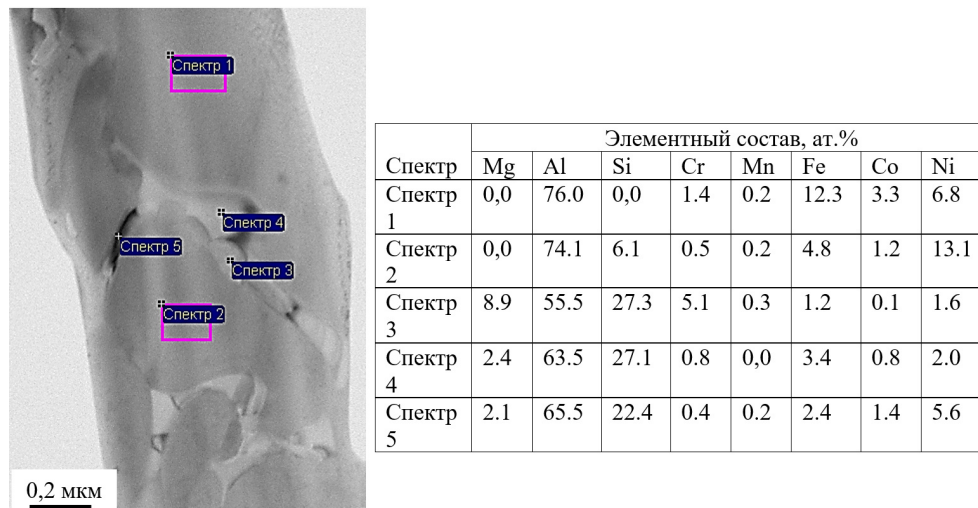


Рис.3. ПЭМ изображение формирующейся области контакта сплава 5083 и ВЭС; в таблице приведен элементный состав данного участка фольги.

Fig.3. TEM image forming in the area of contact between the 5083 alloy and the HEA; the table shows the elemental composition of this section of the foil

На рис.2 приведено изображение структуры, формирующейся при скоростной кристаллизации эвтектики, представленной твердым раствором на основе Al-Mg (области светлого контраста, спектры 3 и 4) и твердым раствором на основе алюминия и атомов ВЭС (области темного контраста, спектры 1 и 2). Отметим, что в областях светлого контраста концентрация магния близка к концентрации, характерной для сплава 5083. В областях темного контраста магний не обнаружен. Следует также отметить присутствие в эвтектике двух типов областей темного контраста, различающихся по концентрации в них элементов ВЭС: во-первых, области, основными элементами которых являются алюминий и никель (спектр 1) и, во-вторых, области, основными элементами которых являются алюминий, хром и, в меньшей степени, никель (спектр 2).

На рис.3 приведено электронно-микроскопическое изображение (метод STEM анализа фольги) структуры зерен (спектры 1 и 2) микронных и субмикронных размеров, формирующихся в области контакта сплава 5083 и ВЭС. Зерна разделены прослойками второй фазы, толщина которых изменяется в пределах от 70 нм до 110 нм. Прослойки имеют сложный элементный состав (содержат химические элементы сплава 5083 и ВЭС).

Облучение зоны контакта сплава 5083 и ВЭС импульсным электронным пучком сопровождается формированием в зернах подложки включений второй фазы. Микродифракционный анализ структуры зерен с включениями

пластинчатой морфологии показывает, что микрорентгенограмма, полученная с этих частиц, содержит рефлексы фаз: $SiAl_9FeSi_3$ и $Ni_{16}Cr_6Si_7$. Отмечено образование зерен сплава 5083, содержащих включения пластинчатой и глобулярной формы, сформированных как химическими элементами подложки, так и элементами ВЭС.

В объеме зерен подложки выявлена сетчатая дислокационная субструктура; скалярная плотность дислокаций составляет $2,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Формирование дислокационной субструктуры в зернах подложки может быть обусловлено термическими напряжениями, возникающими в материале при высокоскоростной обработке, инициированной облучением импульсным электронным пучком.

Методами ПЭМ анализа проведены исследования структуры зерен эвтектики, обогащенных химическими элементами ВЭС. Выявлено, что присутствуют наноразмерные (8-15 нм) включения, а включения больших размеров (30-60 нм) выявленные на границах данных областей.

Методами микродифракционного анализа с применением методики темнопольного изображения выполнены исследования фазового состава участка фольги, представленного на рис.4. Анализируя результаты, представленные на рис.4, можно отметить, что зерна темного контраста сформированы фазой Al_3Ni (рис.4в); зерна светлого контраста – твердым раствором на основе алюминия; в объеме зерен Al_3Ni присутствуют частицы фазы Fe_2Al_5 , размеры которых изменяются в пределах (35-70) нм.

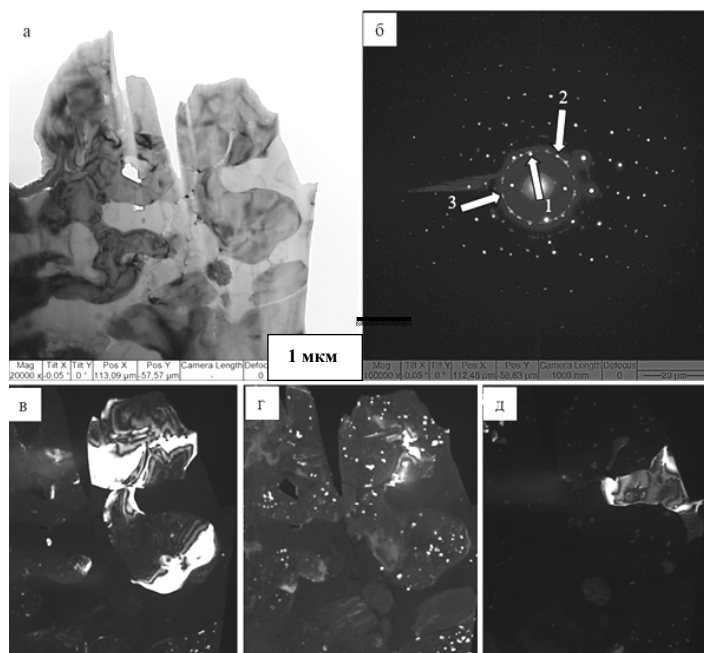


Рис.4. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава 5083 в зоне контакта с ВЭС; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в-д – темные поля, полученные в рефлексах [031] Al₃Ni (в), [404]Fe₂Al₅ (г), [111]Al (д). На (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (в), 2 – для (г), 3 – для (д)

Fig.4. Electron microscopic image of the 5083 alloy structure in the zone of contact with the HEA; a – light field; b – microelectron diffraction pattern; (c-e) dark fields obtained in (c) [031] Al₃Ni, (d) [404]Fe₂Al₅, and (e) [111]Al reflections. Arrows in (b) indicate reflections in which dark fields were obtained: 1 – for (c), 2 – for (d), 3 – for (e)

Электронно-микроскопический микрофракционный анализ зеренной структуры, содержащей включения второй фазы в виде прослоек, разделяющих зерна, показал, что зерна микронных размеров сформированы твердым раствором на основе алюминия, прослойки второй фазы, разделяющие зерна, имеют фазовый состав Al₈Si₆Mg₃Fe, зерна субмикронных (200-250 нм) размеров сформированы кремнием.

Закключение

Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры зоны контакта сплава 5083 (подложка) и ВЭС AlFe-CoCrNi (покрытие), сформированной методом проволоочно-дугового аддитивного производства и облученной импульсными электронными пучками, выполненные в настоящей работе методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, выявили взаимное легирование покрытия и подложки. Высокоскоростное охлаждение зоны контакта системы «покрытие (ВЭС)/(5083) подложка», при импульсном термическом воздействии, инициированном импульсными электронными пучками, привело к формированию

многоэлементной, многофазной субмикроннокристаллической структуры, образовавшейся преимущественно в сплаве 5083, обладающем более низкой, температурой плавления по сравнению с ВЭС.

Список литературы

1. 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. V. 6, N. 5. P. 299–303.
2. 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.
3. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer: *Advanced structured materials*. 2021. V. 107. 110 p.
4. 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.
5. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties

of high entropy alloys: a review // *J. Mater. Res. Technol.* 2016. V. 5, N 4. P. 384–393.

6. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Sci China Mater.* 2018. V. 61. N 1. P. 2–22.

7. 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 Mater. Sci.* 2014. V. 61. P. 1–93.

8. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Mater.* 2017. V. 122. P. 448–511.

9. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review // *Mater. Res. Lett.* 2014. V. 2:3, N 3. P. 107–123.

10. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.

11. Zhang Y. High-Entropy Materials. A brief introduction. Singapore: Springer Nature, 2019. 159 p.

12. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение.* 2020. Т. 121. С. 807–841.

13. 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.

14. 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.

15. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Кириллова А.В. Модифицирование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi импульсным электронным пучком // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* 2022. № 1. С. 65–76.

16. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeNiCo HEA irradiated with a pulsed electron beam // *Journal Mater. Res. And Techn.* 2022. V. 19. P. 4258–4269.

17. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi HEA irradiated by pulsed electron beam // *Metals.* 2021. V. 11(8). No. 1228.

18. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.

19. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.

20. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 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.

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

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

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

А.Б. Юрьев – доктор технических наук, доцент, ректор Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. 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 outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 5(6), 299–303.

2. 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.

3. Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Osintsev, K. A. (2021). Structure and properties of high-entropy alloys. *Springer: Advanced structured materials*, (107), 110.

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. Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O. & Oke, S. R. (2016). Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *J. Mater. Res. Technol.*, 4(5), 384–393.
6. Zhang, W., Liaw, P. K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Sci China Mater.*, 1(61), 2–22.
7. 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 Mater. Sci.*, (61), 1–93.
8. Miracle, D. B. & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.*, (122), 448–511.
9. Tsai, M.-H. & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Mater. Res. Lett.*, 3(2:3), 107–123.
10. Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S. & Bhattacharjee, P. P. (2019). High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier. P. 374.
11. Zhang, Y. (2019). High-Entropy Materials. A brief introduction. Singapore: Springer Nature. P. 159.
12. Rogachev, A. S. (2020). Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of metals and metallurgy*, (121), 807–841. (In Russ.).
13. Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Panchenko, I. A. (2021). High entropy alloys: structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Ferrous metallurgy*, 4(64), 249–258. (In Russ.).
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. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Shlyarova, Yu. A., Konovalov, S. V., Vorobyov, S. V. & Kirillova, A. V. (2022). Modification of the structure and properties of the high-entropy CrMnFeCoNi alloy by a pulsed electron beam. *Problems of ferrous metallurgy and material science*, 1, 65–76. (In Russ.).
16. Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Shlyarova, Yu. A., Vorobyov, S. V. & Semin, A. P. (2022). Structure and properties of CrMnFeNiCo HEA irradiated with a pulsed electron beam. *Journal Mater. Res. And Techn.*, (19), 4258–4269.
17. Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Konovalov, S. V., Panchenko, I. A. & Vorobyov, S. V. (2021). Evolution of structure in Al-CoCrFeNi HEA irradiated by pulsed electron beam. *Metals*, 11(8), 1228.
18. Egerton, F. R. (2016). Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing. P. 196.
19. Kumar, C. S. S. R. (2014). Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer. P. 717.
20. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing. 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.

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

I. A. Panchenko – Ph.D. Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University.

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

A. B. Yuryev – Doctor of Technical Sciences, Rector, Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was received by the editorial board on 10 Apr. 23; approved after reviewing 24 Apr. 23; accepted for publication 10 May 23.