



УДК 536.625:539.25:539.651

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-666-672

Оригинальная статья
Original article

АНАЛИЗ ЗОНЫ КОНТАКТА СИСТЕМЫ ПОКРЫТИЕ – ПОДЛОЖКА, ПОДВЕРГНУТОЙ ОБЛУЧЕНИЮ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

М. О. Ефимов¹, Ю. Ф. Иванов², В. Е. Громов¹,
Ю. А. Шлярова¹, И. А. Панченко¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Аннотация. Методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM – *wire arc additive manufacturing*) на подложке из алюминиевого сплава 5083 сформировано покрытие из высокоэнтропийного сплава Mn–Cr–Fe–Co–Ni неэквивалентного состава. Методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен анализ структуры, фазового и элементного состава зоны контакта после облучения сильноточными низкоэнергетическими электронными пучками с параметрами: энергия ускоренных электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см²; длительность импульса пучка электронов 200 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹. Многофазная многоэлементная субмикро- и нанокристаллическая структуры формируются преимущественно в подложке, которая имеет более низкую температуру плавления по сравнению с ВЭС. В контактном слое, имеющем извилистые границы, происходит взаимное легирование системы покрытие – подложка. 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 находятся прослойки второй фазы, обогащенные атомами покрытия и подложки. В слое, примыкающем к покрытию, ячейки сформированы сплавом состава 0,17 % Mg – 20,3 % Al – 4,3 % Cr – 16,7 % Fe – 9,3 % Co – 49,2 % Ni, соответствующего покрытию. По границам ячеек располагаются прослойки второй фазы, обогащенные преимущественно магнием и в меньшей степени атомами покрытия ВЭС. Центральная область зоны контакта толщиной примерно 1700 мкм сформирована кристаллитами пластинчатой формы, что свидетельствует об эвтектической природе ее образования. Ее основным элементом является алюминий (примерно 77 % (ат.)).

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, сплав 5083, метод проволоочно-дугового аддитивного производства, импульсный электронный пучок, элементный и фазовый состав, структура, зона контакта

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 20-19-00452 и грант № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

Для цитирования: Ефимов М.О., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Панченко И.А. Анализ зоны контакта системы покрытие – подложка, подвергнутой облучению импульсным электронным пучком. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(6):666–672. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-666-672>

ANALYSIS OF CONTACT ZONE OF COATING-SUBSTRATE SYSTEM EXPOSED TO IRRADIATION WITH A PULSE ELECTRON BEAM

М. О. Efimov¹, Yu. F. Ivanov², V. E. Gromov¹,
Yu. A. Shlyarova¹, I. A. Panchenko¹¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Abstract. Using the wire-arc additive manufacturing method (WAAM) on a 5083 aluminum alloy substrate, a non-equiatomic Mn–Cr–Fe–Co–Ni high-entropy alloy (HEA) coating was formed. By scanning and transmission electron diffraction microscopy we analyzed the structure, phase and elemental composition of the contact zone after irradiation with high-current low-energy electron beams with the following parameters:

accelerated electron energy 18 keV, electron beam energy density 30 J/cm², electron beam pulse duration 200 μs, number of pulses 3, pulse repetition rate 0.3 s⁻¹. Multiphase multielement submicro- and nanocrystalline structures are formed predominantly in the substrate, which has a lower melting temperature compared to HEAs. Mutual doping of the coating – substrate system occurs in the contact layer, which has sinuous boundaries. 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 in atoms of the coating and substrate, are 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 corresponding to the coating. Interlayers of the second phase, enriched mainly in magnesium and, to a lesser extent, in atoms of the HEA coating, are located along the cell boundaries. Central region of the contact zone with a thickness of ~1700 μm is formed by lamellar crystallites, which indicates the eutectic nature of its formation. Its main element is aluminum (~77 at. %).

Keywords: high-entropy alloy, 5083 alloy, wire-arc additive manufacturing method, pulsed electron beam, elemental and phase composition, structure, contact zone

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-19-00452 and grant no. 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

For citation: Efimov M.O., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. Analysis of contact zone of coating-substrate system exposed to irradiation with a pulse electron beam. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):666–672. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-666-672>

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия сформировался значительный научный интерес к разработке и исследованию высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) благодаря их уникальной микроструктуре, композиционному составу, механическим и функциональным свойствам [1; 2]. Первыми из таких материалов были выбраны сплавы систем Al–Co–Cr–Fe–Ni и сплав Кантора Mn–Co–Cr–Fe–Ni [3; 4]. Наряду с характеристиками, типичными для металлических сплавов, ВЭС обладают уникальными и необычными свойствами, присущими, например, металлокерамикам: высокой твердостью и стойкостью по отношению к температурному разупрочнению, дисперсионным твердением, положительным температурным коэффициентом упрочнения, высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, высокими износостойкостью и коррозионной стойкостью, рядом других характеристик [5 – 8].

В обзорах [8 – 11] проанализированы структурно-фазовые состояния, свойства, моделирование, методы получения и области применения наиболее перспективных ВЭС и отмечено, что появление ВЭС является значительным шагом вперед в развитии металлических сплавов.

В настоящее время интенсивно накапливается информация о структурно-фазовых состояниях, дефектной субструктуре, стабильности, деформационном поведении в широком диапазоне температур, влиянии легирования и других факторов, новых методах получения ВЭС [12 – 17]. В физике ВЭС намечилось определенное направление улучшения поверхностных свойств за счет различных видов обработки, включая облучение низкоэнергетическими высокопоточными электронными пучками. Электронно-пучковая обработка обеспечивает сверхвысокие (до 10⁸ К/с) скорости нагрева поверхности и ее охлаждения за счет теплоотвода в основной объем материала, что ведет к образованию неравновесных субмикро- и нанокристалличес-

ких структурно-фазовых состояний, формированию столбчатой структуры и гомогенизации химического состава [18].

Целью настоящей работы является анализ структурно-фазовых состояний зоны контакта слоя ВЭС (покрытие), сформированного методом проволочно-дугового аддитивного производства на сплаве 5083 (подложка) и подвергнутого электронно-пучковой обработке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использована система «покрытие–подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав элементного состава Mn–Cr–Fe–Co–Ni, который был сформирован на подложке методом проволочно-дугового аддитивного производства [1; 2]. Подложкой являлся сплав 5083. Облучение зоны контакта системы «покрытие–подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛЮ» 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 (аргона) в камере установки $p = 0,02$ Па. Исследования структурно-фазовых состояний 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 [19 – 21]. 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,

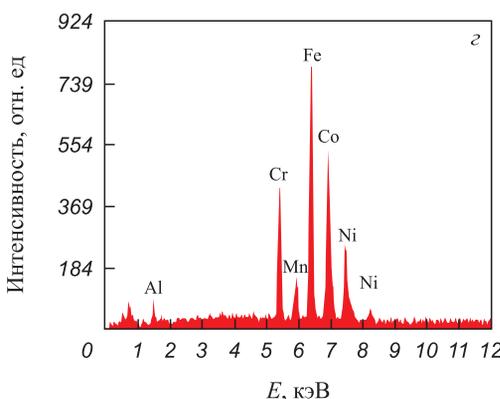
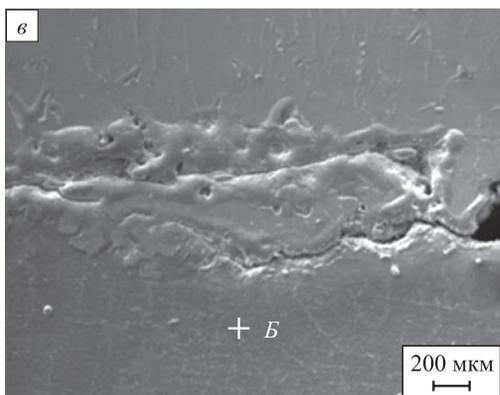
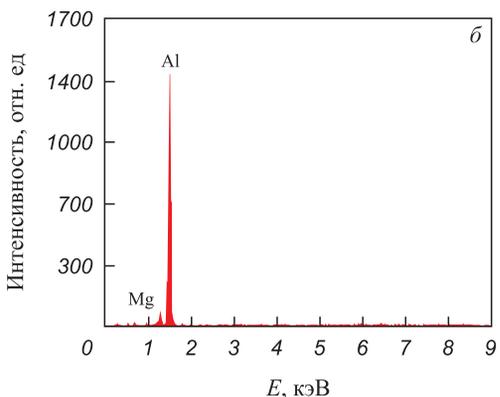
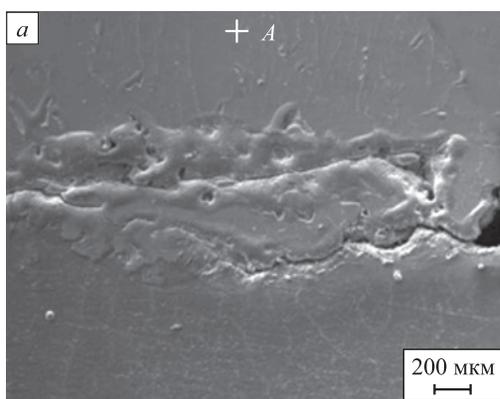


Рис. 1. Структура области контакта наплавки ВЭС и подложки (AMg5), облученной импульсным электронным пучком (а, в) и энергетические спектры, полученные с области А (б) и области В (г)

Fig. 1. Structure of the contact zone of HEA surfacing and substrate (AMg5) irradiated with a pulsed electron beam (a, v) and energy spectra obtained from regions A (б) and B (г)

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

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведено электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения зоны контакта покрытия (ВЭС) и подложки (сплав 5083). Отчетливо видно, что формируется протяженный слой толщиной до 700 мкм, характеризующийся наличием микротрещин, расположенных вдоль границы контакта со стороны подложки. Контактный слой имеет извилистые границы, что может свидетельствовать 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. 1, а, б, область анализа А), а приконтактный слой подложки – элементами ВЭС (рис. 1, в, г, область анализа В). 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. 2. Наблюдается плавное изменение элементного состава зоны контакта (рис. 2, б). Это может свидетельствовать об отсутствии вихревых потоков при использованном способе наплавки покрытия на подложку и последующем облучении импульсным электронным пучком.

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 составов, выполненные методами тонких фольг, осуществляли по слоям (рис. 2, б).

Т а б л и ц а 1

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава покрытия в области А и подложки в области В

Table 1. Results of microrentgenospectral analysis of elemental composition of the coating in A region and the substrate in B region

| Область | Содержание, % (ат.) | | | | | | |
|---------|---------------------|------|------|-----|------|------|------|
| | Mg | Al | Cr | Mn | Fe | Co | Ni |
| А | 5,7 | 92,4 | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 |
| В | 0 | 12,3 | 12,6 | 2,7 | 32,5 | 25,3 | 14,6 |

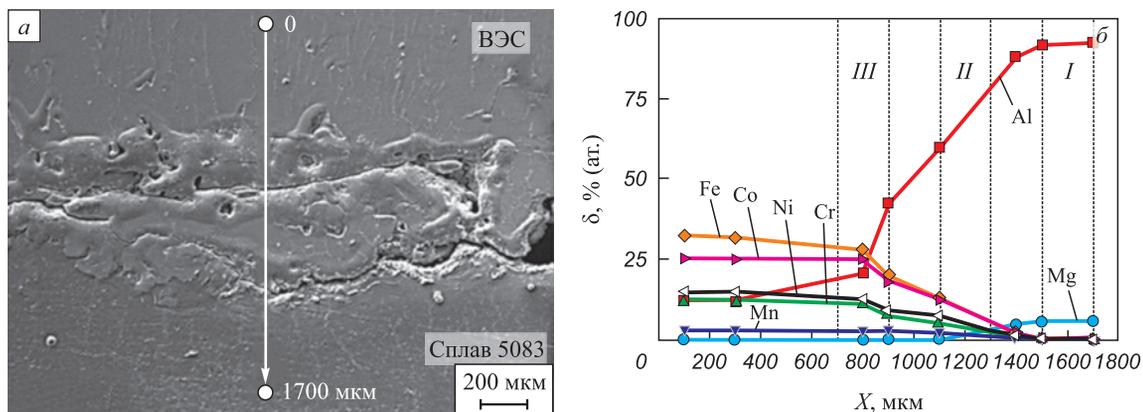


Рис. 2. Зависимости концентрации легирующих элементов (δ) зоны контакта покрытия и подложки, выявленные вдоль линии (0 – 1700), приведенной на поз. а (цифрами I, II, III обозначены слои, в которых осуществлялся анализ структурно-фазовых состояний методами ТЕМ и STEM)

Fig. 2. Dependences of alloying elements concentration (δ) of the contact zone of coating and substrate identified along the line (0 – 1700) shown on a (I, II, III – layers in which the analysis of structural-phase states was carried out by TEM and STEM methods)

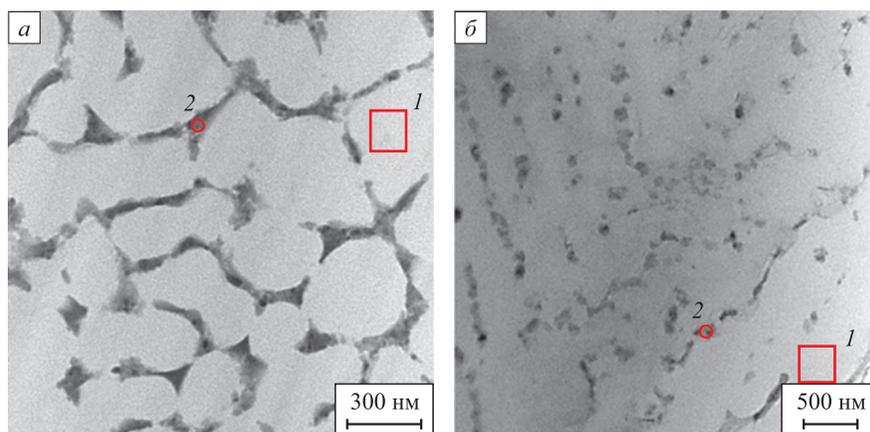


Рис. 3. Структура слоя I системы «наплавка – подложка», облученной импульсным электронным пучком (цифрами 1 и 2 обозначены области микрорентгеноспектрального анализа элементного состава сплава)

Fig. 3. Structure of layer I of the surfacing – substrate system irradiated by a pulsed electron beam (1 and 2 – areas of micro-X-ray spectral analysis of the alloy elemental composition)

Установлено, что структура слоя I сформирована ячейками высокоскоростной кристаллизации (рис. 3, а). По мере удаления от зоны контакта с покрытием ячеистая структура вырождается в слоистую (рис. 3, б). Объем ячеек является твердым раствором магния в алюминии, что соответствует сплаву 5083 (табл. 2, области анализа 1 и 2 указаны на рис. 3). 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 Mg₂Si.

Слой II имеет пластинчатую структуру и образован, очевидно, в результате эвтектического превращения, имеющего место при высокоскоростной термической

Т а б л и ц а 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава системы «наплавка – подложка», облученной импульсным электронным пучком

Table 2. Results of micro-X-ray spectral analysis of the elemental composition of the surfacing – substrate system irradiated with a pulsed electron beam

| Спектр | Содержание, % | | | | | | | |
|-----------|---------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | Mg | Al | Si | Cr | Mn | Fe | Co | Ni |
| Область А | | | | | | | | |
| 1 | 3,55 | 96,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 5,69 | 83,06 | 3,95 | 0,27 | 0,38 | 1,44 | 0,41 | 4,79 |
| Область Б | | | | | | | | |
| 1 | 3,00 | 97,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 10,73 | 80,65 | 2,43 | 0,29 | 0,31 | 1,25 | 0,33 | 4,02 |

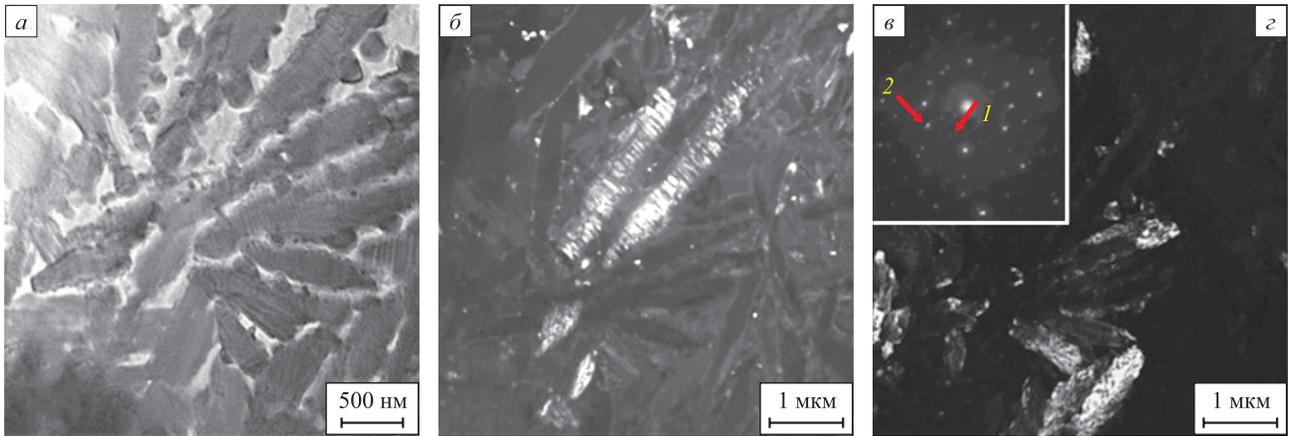


Рис. 4. Структура слоя II системы «наплавка – подложка»: *a* – светлопольное изображение; *б, в* – темнопольные изображения; *е* – микроэлектроннограмма с участка фольги (*a*). Изображение (*б*) получено в рефлексе $[113]Al_{13}Fe_4$; изображение (*в*) получено в рефлексах $[101]Cr-Ni-Fe + [114]Al_6Fe$; на поз. (*е*) обозначены рефлексы, в которых получены темные поля 1 (*б*) и 2 (*в*)

Fig. 4. Structure of layer II of the surfacing – substrate system: *a* – light-field image; *б, в* – dark-field images; *е* – microelectronogram from the foil section (*a*). Image (*б*) was obtained in reflex $[113]Al_{13}Fe_4$; image (*в*) was obtained in reflexes $[101]Cr-Ni-Fe + [114]Al_6Fe$; on (*е*) the reflexes are indicated in which the dark fields 1 (*б*) and 2 (*в*) are obtained

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

Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм установлено, что данный слой сформирован пластинами следующих фаз: $Al_{13}Fe_4$ (рис. 4, *б*), Cr–Ni–Fe и Al_6Fe (рис. 4, *в*).

Слой III, как и слой I, сформирован ячейками высо-

коскоростной кристаллизации (рис. 5, *a*). Объем ячеек образован сплавом состава 0,17 % Mg – 20,3 % Al – 4,3 % Cr – 16,7 % Fe – 9,3 % Co – 49,2 % Ni, что соответствует ВЭС, легированному элементами подложки. Прослойки второй фазы, расположенные по границам ячеек, также сформированы элементами, формирующими наплавку и подложку (41,5 % Mg – 10,9 % Al – 9,0 % Cr – 1,0 % Mn – 15,2 % Fe – 4,1 % Co – 18,4 % Ni).

Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм установлено, что объем ячеек высокоскоростной кристал-

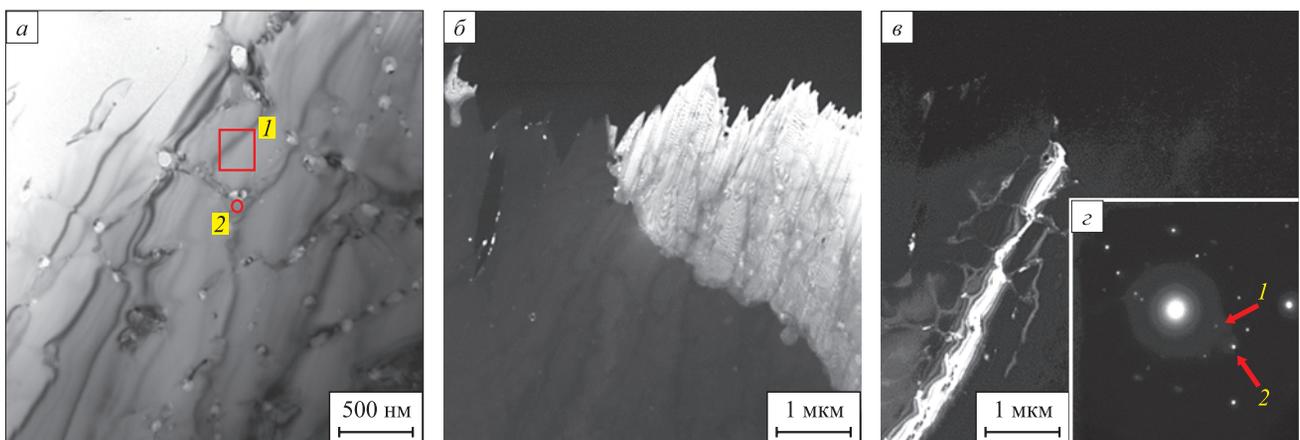


Рис. 5. Структура слоя III системы «наплавка – подложка» после электронно-пучковой обработки: *a* – светлопольное изображение; *б, в* – темнопольные изображения и микроэлектроннограмма (*е*), полученные с участка фольги (*a*). Изображение (*б*) получено в рефлексе $[210]Cr-Ni-Fe$; изображение (*в*) получено в рефлексах $[222]Cr-Ni-Fe + [880]Al_{18}Cr_2Mg_3$; на поз. *е* обозначены рефлексы, в которых получены темные поля 1 (*б*) и 2 (*в*)

Fig. 5. Structure of layer III of the surfacing – substrate system after electron beam processing: *a* – light-field image; *б, в* – dark-field images and microelectronogram (*е*) obtained from the foil section (*a*). Image (*б*) was obtained in the reflex $[210]Cr-Ni-Fe$; image (*в*) was obtained in reflexes $[222]Cr-Ni-Fe + [880]Al_{18}Cr_2Mg_3$; on (*е*) the reflexes are indicated in which dark fields 1 (*б*) and 2 (*в*) are obtained

лизации сформирован твердым раствором на основе ВЭС, легированного алюминием и магнием (рис. 5, б). Ячейки кристаллизации разделены прослойками фазы $Al_{18}Cr_2Mg_3$ (рис. 5, в).

Выводы

Методом проволочно-дугового аддитивного производства на сплаве 5083 сформировано покрытие ВЭС неэквивалентного элементного состава Mn–Cr–Fe–Co–Ni. Осуществлено облучение зоны контакта системы «покрытие – подложка» интенсивным импульсным электронным пучком. Методами современного физического материаловедения выполнены исследования элементного и фазового составов, состояния дефектной субструктуры сплава, формирующейся в зоне контакта системы «подложка – покрытие». Выявлено взаимное легирование покрытия и подложки в слое толщиной приблизительно 1700 мкм. Показано, что высокоскоростное охлаждение зоны контакта системы «покрытие – подложка», имеющее место при термическом воздействии, инициированном импульсным электронным пучком, привело к формированию многоэлементной, 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 (примерно 77 % (ат.)). Контактный слой, примыкающий к покрытию, имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Объем ячеек сформирован сплавом состава 0,17 % Mg – 20,3 % Al – 4,3 % Cr – 16,7 % Fe – 9,3 % Co – 49,2 % 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 / REFERENCES

- Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer: Advanced Structured Materials; 2021;107:110. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
- 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 вузов. Черная металлургия*. 2021;64(4):249–258. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(4):249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- 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>
- Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375-377:213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
- Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – A new era of exploitation. *Materials Science Forum*. 2007;560:1–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
- Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys. *JOM*. 2012;64(7): 830–838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
- Yeh J.-W. Recent Progress in high-entropy alloys. *European Journal of Control*. 2006;31(6):633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
- Yeh J.-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*. 2013;65(12):1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
- Zhang L.-S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*. 2013;631-632:227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
- 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;61:1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*. 2013;39:74–78. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>
- Li D.Y., Zhang Y. The ultrahigh charpy impact toughness of forged AlCoCrFeNi high entropy alloys at room and cryogenic temperatures. *Intermetallics*. 2016;70:24–28. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2015.11.002>
- Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16(9):4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
- 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>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1): 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*. 2014;2(3):107–123. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
- 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. *Journal of Materials Research and Technology*. 2016;5(4):384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
- Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron

beam. *Metals*. 2021;11(8):1228.

<https://doi.org/10.3390/met11081228>

19. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel; 2016:96.

20. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York; 2014:717.

21. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin; 2016:518.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Михаил Олегович Ефимов, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-4890-3730

E-mail: moefimov@mail.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-1631-9644

E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

Mikhail O. Efimov, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-4890-3730

E-mail: moefimov@mail.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Yuliya A. Shlyarova, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Researcher of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-1631-9644

E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. О. Ефимов – нанесение покрытия ВЭС состава Mn – Cr – Fe – Co – Ni на подложку сплава 5083, написание статьи.

Ю. Ф. Иванов – проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов.

В. Е. Громов – формирование концепции работы, анализ ПЭМ изображений, написание статьи.

Ю. А. Шлярова – обзор литературы, подготовка составляющих элементов ВЭС, оформление статьи.

И. А. Панченко – облучение образцов, анализ результатов, написание статьи.

M. O. Efimov – coating of Mn – Cr – Fe – Co – Ni HEA on the substrate of alloy 5083, writing the text.

Yu. F. Ivanov – conducting electron microscopic studies, analysis of the results.

V. E. Gromov – formation of the research concept, analysis of TEM images, writing the text.

Yu. A. Shlyarova – literary review, preparation of the HEA constituent elements, design of the article.

I. A. Panchenko – irradiation of the samples, analysis of the results, writing the text.

Поступила в редакцию 02.06.2023

После доработки 15.07.2023

Принята к публикации 11.09.2023

Received 02.06.2023

Revised 15.07.2023

Accepted 11.09.2023