



Краткое сообщение

УДК 536.425:539.25:539.531:669.017

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-467-470

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2339>



## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМ СПЛАВОМ FeCoCrNiAl

Ю. Ф. Иванов<sup>1,2</sup>, В. Е. Громов<sup>2</sup>, К. А. Осинцев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

**Аннотация.** Покрытие высокоэнтропийного сплава (ВЭС) неэквивалентного состава сформировано на подложке из сплава 5083 по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) в атмосфере чистого азота. Методами современного физического материаловедения проведен анализ структуры, элементного состава, микротвердости, износостойкости системы покрытие/подложка.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав, система покрытие/подложка, структура, износостойкость, микротвердость

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 20-19-00452 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037 (проведение контрольных измерений).

**Для цитирования:** Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Осинцев К.А. Структура и свойства покрытия высокоэнтропийным сплавом FeCoCrNiAl // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 467–470. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>

Short report

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY FeCoCrNiAl ALLOY COATING

Yu. F. Ivanov<sup>1,2</sup>, V. E. Gromov<sup>2</sup>, K. A. Osintsev<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

<sup>3</sup> Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

**Abstract.** The coating of a high-entropy alloy (HEA) of non-equiatomic composition was formed on a substrate of alloy 5083 using the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM) in an atmosphere of pure nitrogen. Analysis of the structure, elemental composition, micro-hardness, and wear resistance of the coating/substrate system was carried out using the methods of modern physical materials science.

**Keywords:** high-entropy alloy, coating/substrate system, structure, wear resistance, microhardness

**Funding:** The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project under agreement No. 075-15-2021-709, the unique identifier of the project RF-2296.61321X0037 (control measurements).

**For citation:** Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy FeCoCrNiAl alloy coating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 467–470. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически ориентированных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания металлических материа-

лов, обладающих комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств, а также технологий их получения. В последние годы внимание ученых привлекает новая система сплавов, известная как высокоэнтропийные (ВЭС) [1–3]. Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рас-

смотрены в аналитических обзорах [4 – 6], где описана микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. В настоящее время разрабатываются практически все типы таких сплавов (конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионноустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами), а также покрытия на их основе [7].

Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств покрытия ВЭС, наплавленного на образцы сплава 5083.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы образцы системы покрытие/подложка. Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквивалентного элементного состава FeCoCrNiAl (15,64 % Al, 7,78 % Co, 8,87 % Cr, 22,31 % Fe, 44,57 % Ni (по массе)), который был сформирован на подложке методом WAAM. Подложкой являлся сплав 5083. Методами сканирующей электронной микроскопии (приборы Leo EVO 50 и TESCAN VEGA, оснащенные энергодисперсионными анализаторами INCA Energy) исследовали структуру и элементный состав покрытия и прилегающего к нему слоя подложки. Свойства покрытия и подложки характеризовали микротвердостью (прибор HV-1000, нагрузка на индентор 0,5 Н) и износостойкостью (прибор TRIBOTester, параметры: нормальная нагрузка 2 Н; скорость вращения 25 мм/с; длина пути трения 100 м; радиус дорожки трения 2 мм; контртело – карбид вольфрама в форме шарика диаметром 6 мм; испытания путем сухого трения на воздухе при комнатной температуре).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования механических свойств покрытия выполнены путем построения профиля микротвердости. В объеме покрытия микротвердость изменяется в пределах 6,6 – 6,2 ГПа (рис. 1, область 1) и возрастает до 7,6 ГПа на границе с подложкой (рис. 1, область 2). Твердость подложки у границы с покрытием достигает 1,5 – 1,6 ГПа и снижается до 1,1 ГПа на расстоянии 5 мм от границы (рис. 1, область 3). Трибологические испытания, выполненные на продольном сечении покрытия (сечение параллельно границе раздела покрытие/подложка) в средней его части, показали, что параметр износа составляет  $1,0 \cdot 10^{-5}$  (Н·м)/мм<sup>3</sup>, коэффициент трения покрытия – 0,24.

Исследование поперечного сечения покрытия выявило структуру, характерную для двухфазного материала, в котором в объеме основной фазы присутствуют включения второй фазы. Эти включения имеют округлую (глобулярную) форму и располагаются по

границам зерен основной фазы. Размеры включений второй фазы изменяются в пределах от 2 до 9 мкм.

Слой подложки, прилегающий к покрытию, имеет игольчатую (пластинчатую) структуру, что свидетельствует о легировании подложки химическими элементами покрытия с последующими фазовыми превращениями в подложке. Очевидно, это объясняет факт увеличения микротвердости данного слоя подложки.

Элементный состав системы покрытие/подложка изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 2 приведены результаты анализа элементного состава центральной части покрытия, которые свидетельствуют о наличии в покрытии формирующих ВЭС элементов, наносимых на подложку. Результаты количественного анализа элементного состава покрытия на различном расстоянии от поверхности (x) приведены ниже:

x, мкм	Содержание элемента, % (ат.)				
	Al	Cr	Fe	Co	Ni
100	30,9	11,5	21,9	6,5	29,2
350	30,8	12,3	23,1	6,2	27,6
600	34,8	5,8	15,1	6,1	38,2
900	35,1	7,5	17,5	6,2	33,7

По мере удаления от поверхности покрытия отмечается увеличение концентрации алюминия, которая может достигать примерно 90 % на участке слоя, прилегающего к границе раздела покрытие/подложка. Микрорентгеноспектральным анализом пограничного слоя контакта покрытия и подложки подтверждается факт легирования слоя покрытия толщиной примерно 100 мкм элементами подложки и незначительное проникновение элементов покрытия в подложку в усло-

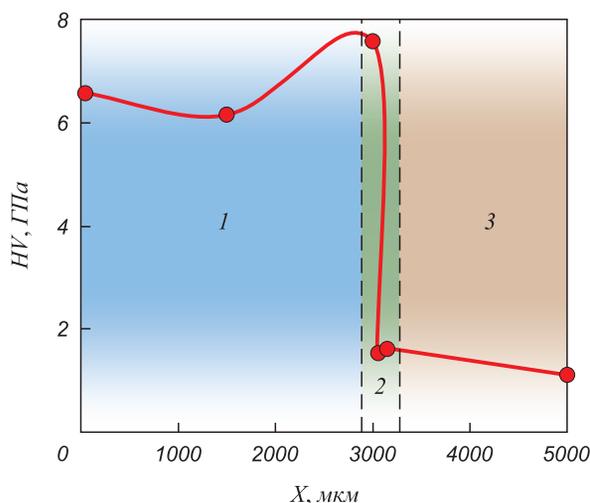


Рис. 1. Профиль микротвердости системы покрытие/подложка: 1 – область покрытия; 2 – переходный слой; 3 – область подложки

Fig. 1. Microhardness profile of the coating/substrate system: 1 – coating area; 2 – transition layer; 3 – substrate area

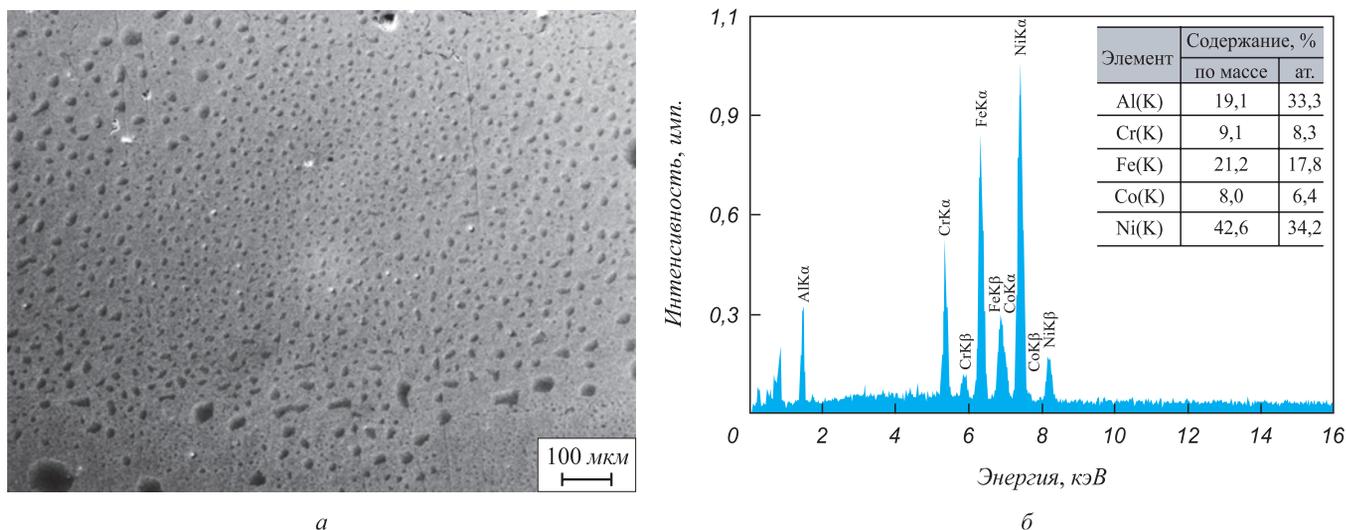


Рис. 2. Структура (а) и энергетические спектры (б), полученные с участка покрытия (а)

Fig. 2. Structure (a) and energy spectra (b) obtained from the coating area (a)

виях низкого уровня контакта подложки и покрытия. В этом случае игольчатая структура в подложке не наблюдается.

При сплавлении покрытия и подложки толщина легированного слоя подложки достигает 450 – 500 мкм. Легирующие элементы распределены по толщине подложки неравномерно. При этом выявляется некоторый квазипериодический характер распределения легирующих элементов, что обусловлено особенностями формирования системы покрытие/подложка.

## Выводы

Методами сканирующей электронной микроскопии, путем определения микротвердости и износостойкости проведены исследования структуры, элементного состава, механических и трибологических свойств системы «покрытие (ВЭС)/(5083) подложка», сформиро-

ванной WAAM методом. Получены следующие основные результаты:

- нанесение ВЭС на поверхность сплава 5083 сопровождается формированием градиентной структуры, характеризующейся закономерным изменением микротвердости, элементного и, очевидно, фазового состава;
- выявлен ступенчатый характер изменения микротвердости системы «покрытие (ВЭС)/(5083) подложка»;
- выявлено легирование примыкающего к подложке слоя покрытия толщиной до 100 мкм элементами подложки;
- легирование подложки элементами покрытия сопровождается в слое толщиной до 500 мкм квазипериодическим изменением элементного состава сплава 5083;
- выявлено формирование в слое подложки, примыкающей к покрытию, игольчатой (пластинчатой) структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review // *Metals and Materials International*. 2019. Vol. 26. P. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
2. Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 478. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
3. Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 733. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
4. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>

5. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
6. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
7. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer, *Advanced Structured Materials*, 2021. Vol. 107. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
5. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
6. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
7. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer, *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 107, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет; *главный научный сотрудник*, Институт сильноточной электроники СО 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

**Кирилл Александрович Осинцев**, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-1150-6747

**E-mail:** kirilloss@yandex.ru

**Yurii F. Ivanov**, *Dr. Sci. (Phys.-Math.)*, Prof., Siberian State Industrial University; *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

**Kirill A. Osintsev**, *Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials*, Samara National Research University, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0003-1150-6747

**E-mail:** kirilloss@yandex.ru

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**Ю. Ф. Иванов** – электронно-микроскопические исследования поверхности разрушения ВЭС, обсуждение результатов.

**В. Е. Громов** – выработка концепции работы, подготовка окончательного варианта статьи.

**К. А. Осинцев** – проведение трибологических испытаний, обзор литературы, обсуждение результатов.

**Yu. F. Ivanov** – electron microscopic studies of destruction surface of wind turbines, discussion of the results.

**V. E. Gromov** – development of the work concept, preparation of the article final version.

**K. A. Osintsev** – conducting tribological tests, literature review, discussion of the results.

Поступила в редакцию 06.05.2022

После доработки 12.05.2022

Принята к публикации 26.05.2022

Received 06.05.2022

Revised 12.05.2022

Accepted 26.05.2022