

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.425:669.017

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.008

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВЭС КАНТОРА FeCoCrNiMn, НАПЛАВЛЕННОГО НА СПЛАВ 5083

Виктор Евгеньевич Громов^{1†}, Сергей Валерьевич Коновалов², Юрий Федорович Иванов³,
Кирилл Александрович Осинцев⁴, Юлия Андреевна Шлярова⁵,
Анастасия Николаевна Гостевская⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

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

⁴ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, ул. Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия

¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

² ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

³ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

⁴ osincev.ka@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>

⁵ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

⁶ lokon1296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-5444>

Аннотация. Начало 21 века ознаменовано вниманием ученых в области физического материаловедения к созданию и изучению покрытий из высокоэнтропийных сплавов. Используя технологию проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM), на подложке из алюминиевого сплава 5083, было сформировано покрытие высокоэнтропийного сплава Кантора FeCoCrNiMn неэквивалентного состава. Методами современного физического материаловедения проведен анализ структуры, элементного состава, микротвердости, износостойкости системы «покрытие-подложка». Установлено, что нанесение покрытия ВЭС FeCoCrNiMn на поверхность сплава 5083 сопровождается формированием градиентов микротвердости и элементного состава. В поперечном сечении покрытия выявлено присутствие микротрещин и микропор. Показано, что в объеме покрытия микротвердость составляет 2,5–3,5 ГПа и возрастает до 9,9 ГПа на границе с подложкой. В средней части покрытия фактор износа равен $2,3 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, коэффициент трения равен 0,7. На границе раздела покрытия и подложки формируется переходный слой толщиной до 450 мкм. Выполнен анализ градиента элементного состава переходного слоя и отмечен высокий уровень химической однородности покрытия. Установлен факт легирования покрытия элементами подложки (алюминием), приводящий к образованию ВЭС FeCoCrNiMnAl, и показано, что легирование покрытия элементами подложки приводит к формированию пластинчатой структуры на границе переходного слоя и подложки.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав Кантора FeCoCrNiMn, покрытие, подложка, сплав алюминия 5083, механические, трибологические свойства, структура.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452).

Для цитирования: Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Гостевская А.Н. Структура и свойства ВЭС Кантора FeCoCrNiMn, наплавленного на сплав 5083 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 205–212. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.008.

Original article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF CANTOR FeCoCrNiMn HEA WELDED ON 5083 ALLOY

Victor E. Gromov^{1†}, Sergey V. Konovalov², Yurii F. Ivanov³, Kirill A. Osintsev⁴, Yulia A. Shliarova⁵, Anastasia N. Gostevksaya⁶^{1, 2, 4, 5, 6} Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia³ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskiy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia⁴ Samara National Research University, 34 Moskovskoe Route, Samara, 443086, Russia¹ gromov@physics.sibsiu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>² ksv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>³ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>⁴ osincev.ka@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>⁵ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>⁶ Ikon1296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-5444>

Abstract. The beginning of the 21st century is marked by the attention of scientists in the field of physical materials science to the creation and study of coatings from high-entropy alloys. Using the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM), a coating of high-entropy Cantor alloy FeCoCrNiMn of non-equiatomic composition was formed on a 5083 aluminum alloy substrate. Using the methods of modern physical materials science, the analysis of the structure, elemental composition, microhardness, and wear resistance of the "coating-substrate" system was carried out. It has been established that the deposition of the HEA FeCoCrNiMn coating on the surface of the 5083 alloy is accompanied by the formation of microhardness and elemental composition gradients. The presence of microcracks and micropores was revealed in the cross section of the coating. It is shown that the microhardness in the bulk of the coating is 2.5-3.5 GPa and increases to 9.9 GPa at the boundary with the substrate. In the middle part of the coating, the wear factor is $2.3 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, the friction coefficient is 0.7. A transition layer up to 450 μm thick is formed at the interface between the coating and the substrate. The gradient of the elemental composition of the transition layer was analyzed and a high level of chemical homogeneity of the coating was noted. The fact of coating doping with substrate elements (aluminum), which leads to the formation of FeCoCrNiMnAl HEA, is established, and it is shown that coating doping with substrate elements leads to the formation of a lamellar structure at the interface between the transition layer and the substrate.

Keywords: high-entropy Cantor alloy FeCoCrNiMn, coating, substrate, aluminum alloy 5083, mechanical, tribological properties, structure.

Acknowledgements: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452).

For citation: Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Shliarova, Yu. A. & Gostevksaya, A. N. (2022). Structure and properties of HEA of Cantor FeCoCrNiMn welded on 5083 alloy. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 205–212. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.008.

Введение

В последние два десятилетия внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к исследованию высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС). Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рассмотрены в аналитических обзорах и монографиях [1-5], где описана микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Ранее Джорджем Е.П. с сотрудниками [1] и нами [5] было показано, что из-за различных методов получения

ВЭС, содержащих химические элементы с различными атомными радиусами, возможно образование наноструктур и даже аморфного состояния. Одним из первых исследуемых высокоэнтропийных сплавов является сплав FeCoCrNiMn, который способен сохранять градиентированную кубическую структуру в широком диапазоне температур, а также обладает хорошим балансом прочности и пластичности [6]. В работе [7] продемонстрировано, что этот сплав одновременно демонстрирует увеличение прочности при комнатной температуре и вязкости при криогенной (77 К) в результате доминирования двойникования в качестве механизма деформации.

Одним из аспектов технического прогресса является разработка и применение новых ВЭС, обладающих высокими механическими, крио- и жаропрочными, коррозионностойкими, особыми магнитными и электрическими свойствами, а также соединений (карбиды, нитриды, оксиды, бориды, силициды) [8, 9]. Приведенный в обзоре [9] анализ областей применения нитридных покрытий из ВЭС охватывает широкий диапазон, включая биомедицину. Они обладают низким модулем эластичности, высокой химической стабильностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью в физиологических средах, низким коэффициентом трения, биологической совместимостью и отличной адгезией к поверхности, на которую осаждаются защитные покрытия.

Вышеизложенное указывает на актуальность и перспективность изучения покрытий из ВЭС. Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств покрытия ВЭС Кантора FeCoCrNiMn, наплавленного на сплав 5083.

Материал и методики исследования

В качестве материала исследования были использованы образцы системы «покрытие/подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквивалентного элементного состава FeCoCrNiMn, который был сформирован на подложке методом проволоочной электродуговой аддитивной технологии (WAAM) [8, 10-12]. Подложкой являлся сплав на основе алюминия 5083 (Табл.1).

Таблица 1. Химический состав сплава 5083 вес %

Table 1. Chemical composition of alloy 5083 weight %

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Другие элементы	Al
<0,25	<0,10	<0,40	4,0÷4,9	<1,0	<0,10	<0,15	<0,25	<0,15	Остальное

Методами сканирующей электронной микроскопии исследовали структуру и элементный состав покрытия и прилегающего к покрытию слоя подложки (микроскоп LEO EV50, Carl Zeiss с энергодисперсионным анализатором). Свойства покрытия и подложки характеризовали микротвердостью (прибор HV-1000) (нагрузка на индентор 0,5 Н) и износостойкостью (прибор TRIBOTester) (факторы: 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 исследования и их обсуждение

Исследования механических свойств покрытия, выполненные путем построения профиля микротвердости, показали, что в объеме покрытия значения микротвердости изменяются в пределах (2,5-3,5) ГПа (рис.1, область 1) и возрастают практически до 10 ГПа (9,91 ГПа) на границе с подложкой (рис.1, область 2). Твердость подложки у границы с покрытием достигает 8 ГПа и быстро (на расстоянии 300 мкм) снижается до 1,1 ГПа, практически соответствуя твердости подложка (1,0 ГПа) (рис.1, область 3). Трибологические испытания, выполненные на продольном сечении покрытия (сечение, параллельное границе раздела покры-

тие/подложка) в средней его части, показали, что фактор износа покрытия равен $2,3 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, коэффициент трения покрытия равен 0,7.

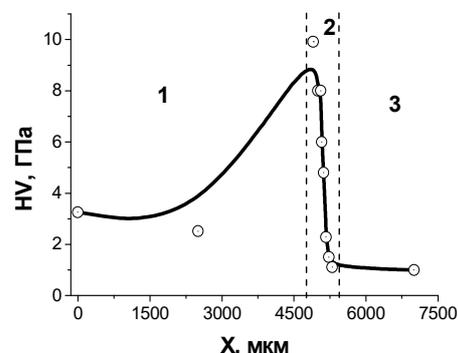


Рис.1. Профиль микротвердости системы «покрытие/подложка»; 1 – область покрытия; 2 – переходный слой; 3 – область подложки

Fig.1. Microhardness profile of the “coating/substrate” system; 1 – coverage area; 2 – transitional layer; 3 – area of the substrate

Результаты исследования структуры системы «покрытие/подложка», полученные методами сканирующей электронной микроскопии травленного шлифа и приведенные на рис.2, демонстрируют наличие трех слоев, а именно, собственно покрытие, переходный слой и собственно подложка. Толщина переходного слоя различается весьма значительно и изменяется в пределах от 100 мкм до 450 мкм. Очевидно, что

сравнительно протяженный переходный слой соответствует области 2 на рис.1 с высокими значениями микротвердости.

Исследование поперечного сечения покрытия выявило присутствие микропор и микротрещин. Травление покрытия показало, что оно, по степени травимости, может быть разделено на три подслоя. Различие степени травимости, очевидно, свидетельствует о неоднородности элементного состава покрытия.

Переходный слой системы «покрытие/подложка» имеет высокоразвитый рельеф, что свидетельствует о вплавлении покрытия в поверхностный слой подложки (рис.2а). Между

переходным слоем и подложкой располагается подслоя, имеющий игольчатую (пластинчатую) структуру (рис.2б).

На рис.3 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава верхней области покрытия. Результаты, представленные на данном рисунке, свидетельствуют о наличии в покрытии элементов, не только входящих в состав ВЭС, но и алюминия, элемента подложки. Результаты количественного анализа элементного состава верхней и средней областей покрытия приведены в Табл.2.

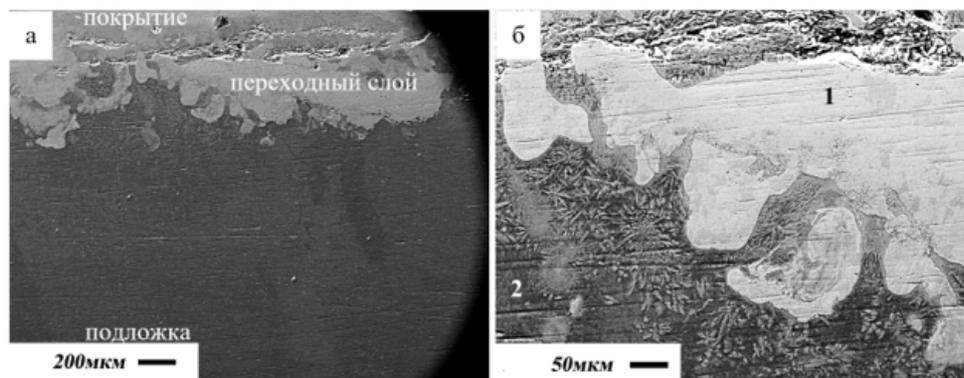


Рис.2. Структура поперечного сечения системы «покрытие/подложка» (Сканирующая электронная микроскопия). На б): 1 – переходный слой, примыкающий к покрытию, 2 – переходный слой, примыкающий к подложке

Fig.2. Cross-sectional structure of the coating/substrate system (Scanning electron microscopy). On b): 1 – transition layer adjacent to the coating, 2 – transition layer adjacent to the substrate

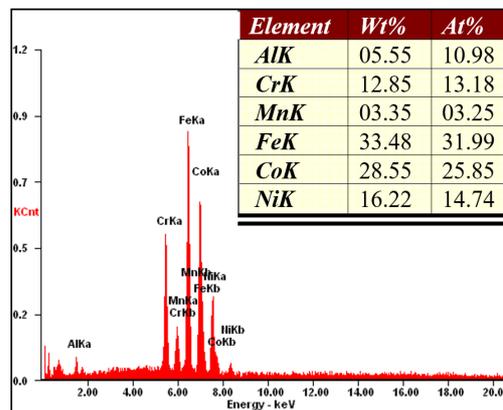


Рис.3. Энергетические спектры, полученные с верхнего участка покрытия

Fig.3. Energy spectra obtained from the upper area of the coating

Таблица 2. Элементный состав различных областей покрытия

Table 2. Elemental composition of different coverage areas

Область покрытия	Элементный состав, ат.%					
	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Верх покрытия	10,9	13,2	3,3	32,0	25,9	14,7
Середина покрытия	9,6	13,1	3,3	32,7	26,7	14,6

Результаты исследования градиента элементного состава покрытия, полученные методом микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» и приведенные в Табл.3, свидетельствуют о высоком уровне химической однород-

ности покрытия. Значимые изменения концентрации выявлены лишь у алюминия, являющегося элементом подложки и попавшем в покрытие в результате диффузии в процессе формирования системы «покрытие/подложка».

Таблица 3. Элементный состав покрытия на различном расстоянии от его поверхности

Table 3. Elemental composition of the coating at different distances from its surface

X, мкм	Элементный состав, ат.%					
	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
60	7,2	13,4	3,9	33,0	27,7	14,8
380	7,2	13,2	3,4	34,0	26,9	15,3
840	5,7	13,7	3,3	34,0	28,4	14,9
1700	8	13,1	3,4	33,2	27,9	14,4
2100	9,5	13,1	3,3	32,7	26,7	14,7

Результаты анализа градиента элементного состава переходного слоя приведены на рис.4. Исследования проводили вдоль двух дорожек, расположенных перпендикулярно поверхности покрытия. Отчетливо видно, что толщина легирующего слоя подложки достигает 450-500 мкм. Легирующие элементы распределены по толщине подложки неравномерно. Для дорожки на рис.4а, концентрация химических элементов, формирующих покрытие, снижается по мере удаления от верхней границы переходного слоя. Для дорожки, приведенной на рис.4б, выявлен максимум концентрации хими-

ческих элементов покрытия в слое, имеющем пластинчатую структуру. Данные результаты подтверждаются результатами исследования, представленными на рис.5.

Выполнен элементный анализ переходного слоя с пластинчатой структурой (рис.5). Результаты количественного анализа областей 1 и 2 приведены в Табл.4.

Анализируя результаты, представленные в Табл.4, можно отметить, что формирование пластинчатой структуры на границе переходного слоя и подложки обусловлено легированием покрытия элементами подложки.

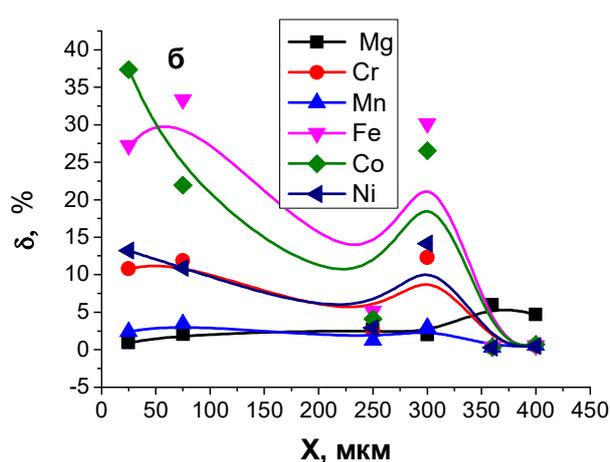
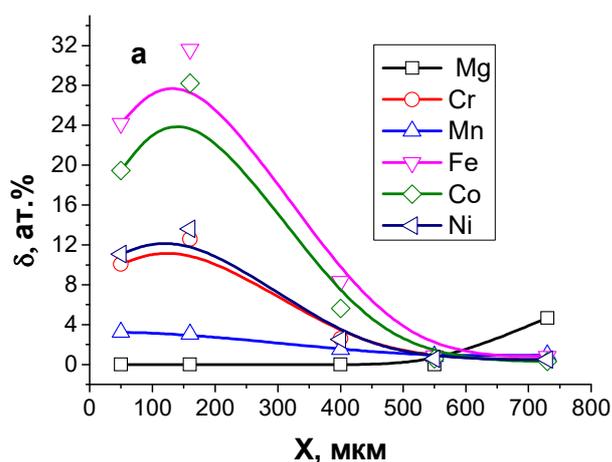


Рис.4. Зависимость концентрации химических элементов, формирующих переходный слой и прилегающий к нему слой подложки, от расстояния от границы раздела переходного слоя и покрытия (Al – остальное); (а) и (б) – две дорожки анализа

Fig.4. Dependence of the concentration of chemical elements that form the transition layer and the substrate layer adjacent to it, on the distance from the interface between the transition layer and the coating (Al is the rest); (a) and (b) two lanes of analysis



Рис.5. Электронно-микроскопическое изображение структуры пластинчатой кристаллизации слоя подложки, примыкающего к переходному слою; значком «+» обозначены участки, элементный состав которых приведен в Табл.4

Fig.5. Electron microscopic image of the structure of lamellar crystallization of the substrate layer adjacent to the transition layer; the “+” sign indicates the areas whose elemental composition is given in Table 4

Таблица 4. Элементный состав участков, указанных на рис.5 значком «+»

Table 4. The elemental composition of the areas shown in Fig.5 with a “+” sign

Область анализа	Элементный состав, ат.%						
	Mg	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
1	4.7	92.3	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5
2	3.1	80.5	2.1	1.5	6.2	4.4	2.2

Заключение

Методами сканирующей электронной микроскопии, путем определения микротвердости и износостойкости проведены исследования структуры, элементного состава, механических и трибологических свойств системы «пленка (ВЭС)/(сплав 5083) подложка», сформированной 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 «пленка (ВЭС)/(сплав 5083) подложка»;
- выявлено формирование переходного слоя толщиной до 450 мкм, расположенного на границе раздела покрытия и подложки;
- выявлено легирование покрытия элементами подложки (алюминием), что приводит к формированию ВЭС химического состава Al-Mn-Fe-Cr-Co-Ni;
- выявлено формирование в слое подложки, примыкающей к покрытию, пластинчатой структуры.

Список литературы

1. Zhang Y. High-Entropy Materials. A Brief 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.
2. 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. V. 26. P. 1099–1133.
3. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. V. 122. P. 448–511.
4. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. V. 61, N 1. P. 2–22.
5. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. ВЭС: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2021. № 4. С. 1–8.
6. Zhang T., Xin L., Wu F., Xiang Chen J., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical of Fe_xCoCrNiMn high-entropy alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. V. 35, N 10. P. 2331–2335.

7. Gludovatz B.A., Hohenwarther A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. V. 345, N 6201. P. 1153–1158.

8. 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.

9. 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.

10. Ivanov Yu. F., Osintsev K. A., Gromov V. E., Konovalov S. V., Panchenko I. A. Deformation Behavior of a High-Entropy Al–Co–Cr–Fe–Ni Alloy Fabricated by Means of Wire-Arc Additive Manufacturing // *Steel in Translation*. 2021. V. 51, N 1. P. 27–32.

11. Osintsev K., Konovalov S., Gromov V., Panchenko I., Ivanov Yu. Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatomic Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} highentropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing // *Philosophical Magazine Letters*. 2021. 8 p.

12. Osintsev K., Konovalov S., Gromov V., Panchenko I., Chen X. Phase composition prediction of Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system based on thermodynamic and electronic properties calculations // *Materials Today: Proceedings*. 2021. 5 p.

Информация об авторах

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.

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

К. А. Осинцев – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва.

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

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

References

1. Zhang, Y. High-Entropy Materials. A Brief George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*, (188), 435–474.

2. Alshataif, Y. A., Sivasankaran, S., Al-Mufadi, F. A., Alaboodi, A. S. & Ammar, H. R. (2019). Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: a review. *Metals and Materials International*, (26), 1099–1133.

3. Miracle, D. B. & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, (122), 448–511.

4. Zhang, W., Liaw, P. K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 1(61), 2–22.

5. Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F. & Panchenko, I. A. (2021). VES: структура, механические свойства, механизмы деформации и применения. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya*, 4, 1–8. (In Russ.).

6. Zhang, T., Xin, L., Wu, F., Xiang Chen, J., Jiang, S., Huang, Y. & Chen, S. (2019). Microstructure and mechanical of Fe_xCoCrNiMn high-entropy alloys. *Journal of Materials Science and Technology*, 10(35), 2331–2335.

7. Gludovatz, B. A., Hohenwarther, A., Catoor, D., Chang, E. H., George, E. P. & Ritchie, R. O. (2014). Fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 6201(345), 1153–1158.

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

9. Pogrebnyak, A. D., Bagdasaryan, A. A., Yakushchenko, I. V. & Beresnev, V. M. (2014). Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе. *Uspekhi khimii*, 11(83), 1027–1061. (In Russ.).

10. Ivanov, Yu. F., Osintsev, K. A., Gromov, V. E., Konovalov, S. V. & Panchenko, I. A.

(2021). Deformation Behavior of a High-Entropy Al–Co–Cr–Fe–Ni Alloy Fabricated by Means of Wire-Arc Additive Manufacturing. *Steel in Translation*, 1(51), 27–32.

11. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov V., Panchenko, I. & Ivanov, Yu. (2021). Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatom Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} highentropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing. *Philosophical Magazine Letters*, 8.

12. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Panchenko, I. & Chen, X. (2021). Phase composition prediction of Al–Co–Cr–Fe–Ni high entropy alloy system based on thermodynamic and electronic properties calculations. *Materials Today: Proceedings*, 5 p.

Information about the authors

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, Pro-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University.

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

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

Yu. A. Shliarova – Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

A. N. Gostevkaya – postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after A.I. prof. V.M. Finkel Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 22.04.2022; принята к публикации 28.04.2022.

The article was received by the editorial board on 12 Apr. 22; approved after reviewing on 22 Apr. 22; accepted for publication on 28 Apr. 22.