



Научная статья
2.6.17. Материаловедение (технические науки)
УДК 621.793.79

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033

 EDN: OLJRHK

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi

Владислав Константинович Дробышев¹, Ирина Алексеевна Панченко²,
Сергей Валерьевич Коновалов³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

¹ drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

² i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Аннотация. Проведено исследование по установлению изменения механических свойств: твердости и микротвердости в зависимости от содержания химического состава высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi. Для исследования микроструктуры, химического состава неметаллических включений и элементного картирования использовались методы сканирующей электронной микроскопии. Размер неметаллических включений составил 8 мкм с выделением оксидных соединений Mn₂O₃. Микроструктурный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии был проведен точно в дендритной области и установил повышенное содержание таких элементов, как Co, Cr, Fe с высокой температурой плавления, а также выделения легкоплавких материалов Ni и Mn в междендритных прослойках.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, микротвердость, твердость, микроструктура, распределение элементов, СЭМ.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

Для цитирования: Дробышев В. К., Панченко И. А., Коновалов С. В. Механические свойства и микроструктура сплавов системы CoCrFeMnNi // Ползуновский вестник. 2024. № 2, С. 249–222. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN: <https://elibrary.ru/OLJRHK>.

Original article

MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF ALLOYS OF THE CoCrFeMnNi SYSTEM

Vladislav K. Drobyshev¹, Irina A. Panchenko², Sergey V. Konovalov³

^{1, 2, 3} Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Industrial University", Novokuznetsk, Russia

¹ drobyshev_v.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1532-9226>

² i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

³ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Abstract. A study was carried out to establish changes in mechanical properties: hardness and microhardness depending on the content of the chemical composition of high-entropy alloys of the CoCrFeMnNi system. Scanning electron microscopy methods were used to study the microstructure, chemical composition of non-metallic inclusions and elemental mapping. The size of non-metallic inclusions was 8 μm with the release of oxide compounds Mn₂O₃. Microstructural analysis using energy dispersive spectrometry was carried out pointwise in the dendritic region and established an increased content of elements such as Co, Cr, Fe with a high melting point, as well as the release of low-melting materials Ni and Mn in the interdendritic layers.

Keywords: high-entropy alloy, microhardness, hardness, microstructure, element distribution, SEM.

Acknowledgements: This study is funded by a grant of the Russian Science Foundation, project 23-49-00015. <https://rscf.ru/en/project/23-49-00015/>.

For citation: Drobyshev, V.K., Panchenko, IA. & Konovalov, S.V. (2024). Mechanical properties and microstructure of alloys of the CoCrFeMnNi system. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 249-222. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN: <https://OLJRHK>.

ВВЕДЕНИЕ

Первым пятикомпонентным высокоэнтропийным сплавом (ВЭС) был CoCrFeNiMn (сплав Кантора) [1–6], который обладает уникальными коррозионными, износостойкими, магнитными и электрическими свойствами. Одна из особенностей данного семейства сплавов – это наличие различных фазовых состояний: однофазные ГЦК, ОЦК, ГПУ. Однофазный высокоэнтропийный сплав CoCrFeMnNi с ГЦК решеткой имеет потенциальные преимущества по механическим параметрам, термической стабильности и превосходной пластичности при низкой температуре [13–19].

В работе [20] отмечено, что существует несколько сотен пятикомпонентных ВЭС, содержащих свыше 40 разных элементов. Эти элементы условно разделены на девять семейств 1 – на основе переходных 3d-металлов Al, Co, Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Ti; 2 – на основе тугоплавких металлов Cr, Hf, Mo, Nb, Ta, Ti, V, W, Zr; 3 – на основе Al, Be, Li, Mn, Se, Sn, Ti, Zn; 4 – на основе переходных 4f-металлов Dy, Gd, Lu, Tb, Tm, Y; 5 – на основе бронз и латуней; 6 – на основе Ag, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pd, Pt, Rh, Ru с каталитическими свойствами; 7 – высокоэнтропийные металлические стекла; 8 – высокоэнтропийные бориды, карбиды, нитриды, оксиды, силициды; 9 – ВЭС пленки и покрытия. В данной работе ограничимся исследованием свойств ВЭС системы CoCrFeNiMn.

Целью данной работы является анализ микроструктуры и механических свойств сплава CoCrFeNiMn с варьированием содержания элементного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi в литом состоянии приведен в таблице 1.

Для проведения исследований использовалось шесть композиций высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi, полученных индукционной плавкой токами высокой частоты.

Твердость сплавов измеряли на твердомере ТК-2М с нагрузкой 100 кгс по шкале В в соответствии с ГОСТ 9031-75. Измерение микротвердости проводилось с использованием микротвердомера HVS-1000 по Виккерсу ГОСТ 9450-76 путём вдавливания алмазной пирамидки. Испытательная нагрузка – 1 кг, длительность нагрузки 10 секунд, шаг измерения 500 мкм.

Микроструктура материала была изучена с использованием сканирующего электронного

микроскопа фирмы KYKY EM-6900, оснащённого SE и BSE детектором.

Таблица 1 – Химический состав сплавов системы CoCrFeMnNi, at %

Table 1 - Chemical composition of the CoCrFeMnNi system, at%

№ партии	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
1	20	20	35	5	20
2	15	15	30	10	20
3	20	20	25	15	20
4	20	20	15	25	20
5	20	20	10	30	20
6	25	25	5	35	20

Элементное картирование осуществлялось с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на приставке Oxford Xplore.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 2 представлены результаты исследования твердости и микротвердости высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi. Исследуемые образцы можно разделить на три группы: первая группа – образцы с повышенными параметрами твердости и микротвердости – сплавы системы $Co_{20}Cr_{20}Fe_{35}Mn_5Ni_{20}$ (1) и $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ (6); вторая группа – образцы со средними механическими параметрами системы $Co_{20}Cr_{20}Fe_{25}Mn_{15}Ni_{20}$ (3) и $Co_{25}Cr_{25}Fe_{10}Mn_{30}Ni_{20}$ (5); третья группа – образцы системы $Co_{15}Cr_{15}Fe_{30}Mn_{10}Ni_{20}$ (2) и $Co_{20}Cr_{20}Fe_{15}Mn_{25}Ni_{20}$ (4) с низкими значениями твердости и микротвердости. Для дальнейшего исследования микроструктуры, элементного картирования с использованием ЭДС рассмотрим сплав с химическим составом $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$, обладающий наивысшими механическими свойствами среди остальных сплавов.

Таблица 2 – Диапазон значений твердости и микротвердости исследуемых ВЭС

Table 2 - Hardness, microhardness of the studied HEAs

№ партии	Твердость, НВ	Микротвердость, НВ
1	114-118	140-149
2	100-102	126-132
3	103-109	131-133
4	98-101	127-131
5	109-112	130-138
6	116-118	141-149

На рисунке 1 (а, b) приведено 2 электронно-микроскопических изображения, взятых с разных участков исследуемого сплава $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$, энергетические спектры и карты распределения элементов, приведены на рисунке 1 (с–f).

По результатам ЭДС анализа дендритные области (спектр 1, 4; рисунок 1, а, b) в литом сплаве $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ отличаются

повышенным содержанием элементов с высокой температурой плавления Co, Cr, Fe (таблица 3). Противоположно этому междендритные прослойки (спектр 2, 3; рисунок 1, а, b) обогащены легкоплавкими элементами Ni и Mn, представленными в таблице 3. Средний размер зерен составил 150–250 мкм.

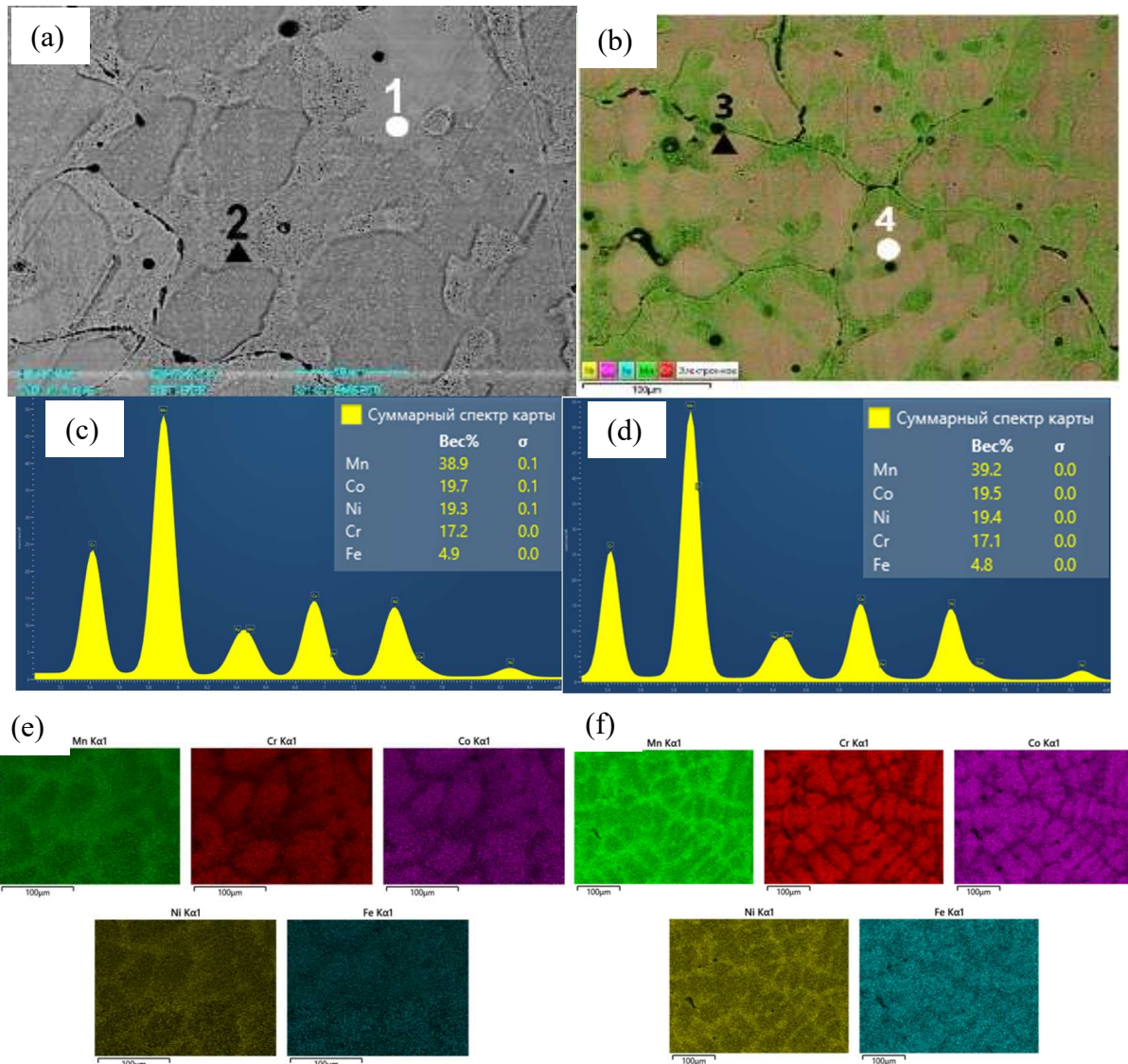


Рисунок 1 – СЭМ для сплава $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ (а–b) Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава, (с–d) Энергетические спектры элементный состав исследуемых областей, (е–f) Карты распределения элементов исследуемых областей

Figure 1 - SEM for the $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ alloy (a) Electron microscopic image of the structure of the x500 alloy (b) Element distribution maps

На рисунке 2 приведен размер исследуемого неметаллического включения (8 мкм) и элементное картирование области сплава $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$, содержащего неметалли-

ческое включение. На основе химического состава (таблица 4) и карты распределения элементов (рисунок 2) выявлено, что состав неметаллического включения сплава $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ в большей степени обогащён

следующими элементами: Mn = 51,70 ат. %, O = 38,73 ат. %, S = 3,85 ат. %.

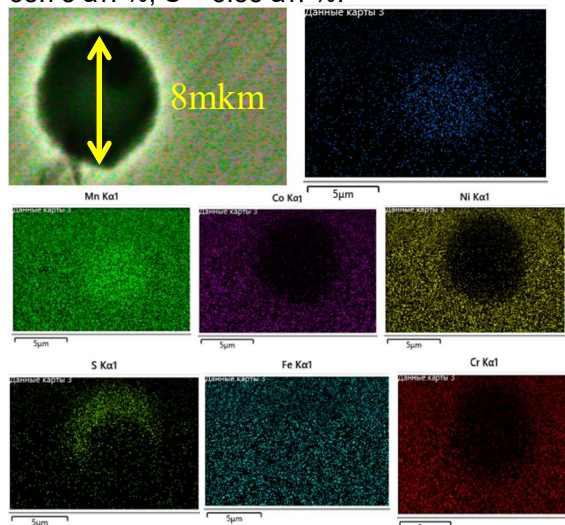


Рисунок 2 – ЭДС картирование и химический состав области, содержащей неметаллическое включение

Figure 2 - EDS mapping and chemical composition of non-metallic inclusion

На рисунке 3 приведён усредненный анализ участка, содержащего неметаллическое включение по глубине исследуемой области. В результате можно отметить выделение элементов Mn и O в диапазоне 15–23 мкм. По данным таблицы 4 и рисунка 3 можно утверждать, что эти выделения являются оксидами (Mn_2O_3).

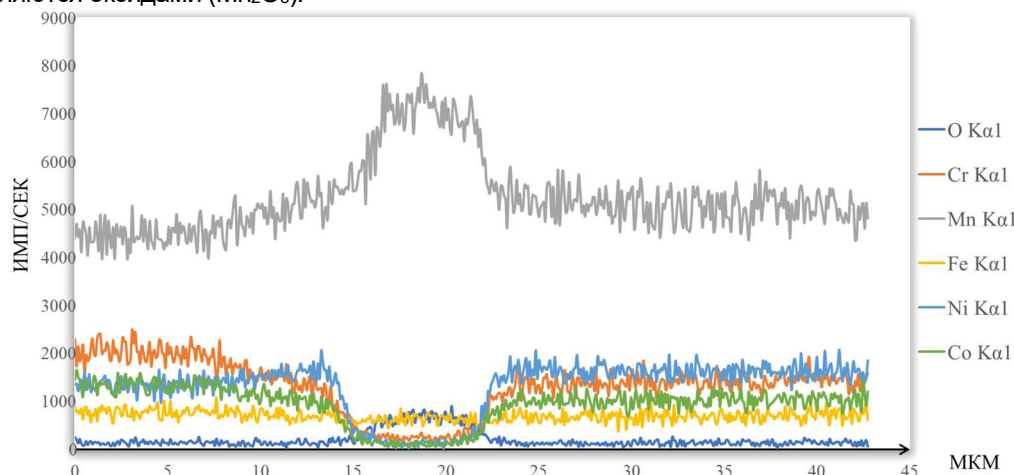


Рисунок 3 – Усреднённое элементное распределение области, содержащей неметаллическое включение

Figure 3 - Averaged elemental distribution in a region containing a nonmetallic inclusion

ВЫВОДЫ

1. В результате проделанной работы проанализированы механические свойства: твердость и микротвердость высокоэнтропийных сплавов системы $CoCrFeMnNi$, где образец $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ продемонстрировал наивысшие значения твердости среди остальных исследуемых материалов в диапазоне 114–118 НВ, микротвердости 140–149 НВ.

252

Таблица 3 – Результаты элементного состава участков сплава $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$

Table 3 - Results of the elemental composition of sections of the $Co_{25}Cr_{25}Fe_5Mn_{35}Ni_{20}$ alloy

Элементы	Спектр 1 ат. %	Спектр 2 ат. %	Спектр 3 ат. %	Спектр 4 ат. %
Co	20.27	14.49	19.53	10.73
Cr	21.35	12.31	19.88	16.08
Fe	5.82	2.91	5.32	3.22
Mn	35.59	47.45	37.89	51.02
Ni	16.97	22.54	17.38	18.95

Таблица 4 – Точечный усредненный химический состав элементов в области неметаллического включения

Table 4 - Point-averaged chemical composition of elements in the region of a non-metallic inclusion

Элементы	ЭДС картирование области, содержащей неметаллическое включение (ат. %)
Co	1.30
Cr	1.78
Fe	0.35
Mn	51.70
Ni	2.30
S	3.85
O	38.73

2. По результатам анализа спектров в дендритной ликвации было установлено выделение марганца в междендритной прослойке до 47,45 ат. % и никеля до 22,54 ат. %. Также отмечено выделение материалов свысокой температурой плавления Co, Cr, Fe в дендритной области.

3. Было установлено, что присутствующее неметаллическое включение в сплаве

Co₂₅Cr₂₅Fe₅Mn₃₅Ni₂₀ состоит из соединений: Mn (51,70 ат. %), O (38,73 ат. %), S (3,85 ат. %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials. 2021. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>.
- 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. Vol. 61. P. 1–93, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.
- Abrahams K., Zomorodpoosh S., Khorasgani A., Roslyakova I., Steinbach I., Kundin J. Automated assessment of a kinetic database for FCC Co–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2021, vol. 29, no. 5, article 05500, <https://doi.org/10.1088/1361-651X/abf62b>.
- George E.P., Curtin W.A., Tسان C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // Acta Materialia. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>.
- Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys // Progress in Materials Science. 2019. Vol. 102. P. 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>.
- S. Haas, A.M. Manzoni, F. Krieg, U. Glatzel. Microstructure and Mechanical Properties of Precipitate Strengthened High Entropy Alloy Al10Co25Cr8Fe15Ni36Ti6 with Additions of Hafnium and Molybdenum, Entropy 21 (2019) 169, doi:10.3390/e21020169.
- Zaddach A.J., Niu C., Koch C.C. [et al.]. Mechanical Properties and Stacking Fault Energies of Ni-FeCrCoMn High-Entropy Alloy. JOM 65, 1780–1789. (2013), <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0771-4>.
- K.B. Zhang, Z.Y. Fu, J.Y. Zhang, J. Shi, W.M. Wang, H. Wang, Y.C. Wang, Q.J. Zhang. Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy, J. Alloys Compd. 502 (2010) 295–299, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.104>.
- M. Kawamura, M. Asakura, N.L. Okamoto, K. Kishida, H. Inui, E.P. George. Plastic deformation of single crystals of the equiatomic Cr–Mn–Fe–Co–Ni highentropy alloy in tension and compression from 10K to 1273K, Acta Mater. (2021) 116454, doi: 10.1016/j.actamat.2020.10.073.
- Lu A. Chauhan, D. Litvinov, M. Walter, A.S. Tirunilai, J. Freudenberger, A. Kauffmann, M. Heilmaier, J. Aktaa. High-temperature low cycle fatigue behavior of an equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy, Materials Science and Engineering: A, Volume 791, (2020), ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139781>.
- W.-R. Wang, W.-L. Wang, S.-C. Wang, Y.-C. Tsai, C.-H. Lai, J.-W. Yeh. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of AlXCoCrFeNi high- entropy alloys, Intermetallics 26 (2012). 44–51, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.03.005>.
- F. Otto, N.L. Hanold, E.P. George. Microstructural evolution after thermomechanical processing in an equiatomic, single-phase CoCrFeMnNi high-entropy alloy with special focus on twin boundaries, Intermetallics 54 (2014) 39–48, doi: 10.1016/j.intermet.2014. 05.014.
- Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Kormann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // Physical Review Materials. 2019. Vol. 3. Article 113603.
- Osintsev K., Kononov S., Ivanov Y., Gromov V., Vorobyev S., Panchenko I. Characterization of Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni High-Entropy Alloy Coating Fabricated onto AA5083 Using Wire-Arc Additive Manufacturing. Metals. 2022; 12(10):1612, <https://doi.org/10.3390/met12101612>.
- Osintsev K., Kononov S., Glezer A., Gromov V., Ivanov Y., Panchenko I. (2021). Research on the structure of Al₂.1Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels. Materials Letters. 294, doi: 10.1016/j.matlet.2021.129717.
- Ivanov Y., Osintsev K., Gromov V., Kononov S., Panchenko I. (2021). Deformation Behavior of a High-Entropy Al–Co–Cr–Fe–Ni Alloy Fabricated by Means of Wire-Arc Additive Manufacturing. Steel in Translation. 51. 27-32, doi: 10.1016/j.intermet.2014. 05.014.
- Ivanov Y., Gromov V., Kononov S., Shugurov V., Efimov M., Teresov A., Petrikova E., Panchenko I., Shliarova Y. (2022). Structure and Properties of Al-Co-Cr-Fe-Ni High-Entropy Alloy Subjected to Electron-Ion Plasma Treatment. Metals. 12. 1987, doi:10.3390/met12111987.
- Nevskii S., Sarychev V., Kononov S., Osintsev K., Ivanov Y., Panchenko I., Gromov V. (2022). Modeling the mechanism of micro / nanostructured surface formation in Al-Co-Cr-Fe-Ni and Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys treated with a high current pulsed electron beam. Letters on Materials. 12. 249–254, doi: 10.22226/2410-3535-2022-3-249-254.
- I-Shataif Y., Sivasankaran S., Al-Mufadi F., Alaboodi A., Ammar H. (2019). Manufacturing Methods, Microstructural and Mechanical Properties Evolutions of High-Entropy Alloys: A Review. Metals and Materials International. 26. 3, doi: 10.1007/s12540-019-00565-z.
- Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high entropy alloys. Fizika metallov i metallovedenie. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 807–841. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>.

Информация об авторах

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

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

В. К. Дробышев – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки

изображений» Сибирского государственного индустриального университета.

REFERENCES

- Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys. Springer. Advanced structured materials. 2021. 110 p, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>.
- 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. Vol. 61. P. 1-93, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.
- Abrahams K., Zomorodpoosh S., Khorasgani A., Roslyakova I., Steinbach I., Kundin J. Automated assessment of a kinetic database for FCC Co–Cr–Fe–Mn–Ni high entropy alloys. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2021, vol. 29, no. 5, article 05500, <https://doi.org/10.1088/1361-651X/abf62b>.
- George E.P., Curtin W.A., Tazan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // Acta Materialia. 2020. Vol. 188. P. 435-474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>.
- Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys // Progress in Materials Science. 2019. Vol. 102. P. 296-345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>.
- S. Haas, A.M. Manzoni, F. Krieg, U. Glatzel. Microstructure and Mechanical Properties of Precipitate Strengthened High Entropy Alloy Al₁₀Co₂₅Cr₈Fe₁₅Ni₃₆Ti₆ with Additions of Hafnium and Molybdenum, Entropy 21 (2019) 169, doi:10.3390/e21020169.
- Zaddach, A.J., Niu, C., Koch, C.C. [et al.]. Mechanical Properties and Stacking Fault Energies of NiFeCrCoMn High-Entropy Alloy. JOM 65, 1780-1789 (2013), <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0771-4>.
- K.B. Zhang, Z.Y. Fu, J.Y. Zhang, J. Shi, W.M. Wang, H. Wang, Y.C. Wang, Q. J. Zhang. Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy, J. Alloys Compd. 502 (2010). 295-299, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.104>.
- M. Kawamura, M. Asakura, N.L. Okamoto, K. Kishida, H. Inui, E.P. George. Plastic deformation of single crystals of the equiatomic Cr–Mn–Fe–Co–Ni high entropy alloy in tension and compression from 10K to 1273K, Acta Mater. (2021) 116454, doi: 10.1016/j.actamat.2020.10.073.
- Lu, A. Chauhan, D. Litvinov, M. Walter, A.S. Tirunilai, J. Freudenberger, A. Kauffmann, M. Heilmaier, J. Aktaa. High-temperature low cycle fatigue behavior of an equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy, Materials Science and Engineering: A, Volume 791, (2020), ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139781>.
- W.-R. Wang, W.-L. Wang, S.-C. Wang, Y.-C. Tsai, C.-H. Lai, J.-W. Yeh. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of AlXCoCrFeNi high-entropy alloys, Intermetallics 26 (2012) 44-51, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.03.005>.

12. F. Otto, N.L. Hanold, E.P. George, Microstructural evolution after thermomechanical processing in an equiatomic, single-phase CoCrFeMnNi high-entropy alloy with special focus on twin boundaries, Intermetallics 54 (2014). 39-48, doi: 10.1016/j.intermet.2014.05.014.

13. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Kormann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // Physical Review Materials. 2019. Vol. 3. Article 113603.

14. Osintsev K., Konovalov S., Ivanov Y. Gromov V., Vorobyev S., Panchenko I. Characterization of Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni High-Entropy Alloy Coating Fabricated onto AA5083 Using Wire-Arc Additive Manufacturing. Metals. 2022; 12(10):1612, <https://doi.org/10.3390/met12101612>.

15. Osintsev K., Konovalov S., Glezer A., Gromov V., Ivanov Y., Panchenko I. (2021). Research on the structure of Al₂.1Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy at submicro- and nanoscale levels. Materials Letters. 294, doi: 10.1016/j.matlet.2021.129717.

16. Ivanov Y., Osintsev K., Gromov V., Konovalov S., Panchenko I. (2021). Deformation Behavior of a High-Entropy Al–Co–Cr–Fe–Ni Alloy Fabricated by Means of Wire-Arc Additive Manufacturing. Steel in Translation. 51. 27-32, doi: 10.1016/j.intermet.2014.05.014.

17. Ivanov Y., Gromov V., Konovalov S., Shugurov V., Efimov M., Teresov A., Petrikova E., Panchenko I., Shiarova Y. (2022). Structure and Properties of Al-Co-Cr-Fe-Ni High-Entropy Alloy Subjected to Electron-Ion Plasma Treatment. Metals. 12. 1987, doi:10.3390/met12111987.

18. Nevskii S., Sarychev V., Konovalov S., Osintsev K., Ivanov Y., Panchenko I., Gromov V. (2022). Modeling the mechanism of micro / nanostructured surface formation in Al-Co-Cr-Fe-Ni and Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys treated with a high current pulsed electron beam. Letters on Materials. 12. 249-254, doi: 10.22226/2410-3535-2022-3-249-254.

19. I-Shataif Y., Sivasankaran S., Al-Mufadi F., Alaboodi A., Ammar H. (2019). Manufacturing Methods, Microstructural and Mechanical Properties Evolutions of High-Entropy Alloys: A Review. Metals and Materials International. 26. 3, doi:10.1007/s12540-019-00565-z.

20. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high entropy alloys. Fizika metallov i metallovedenie. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 807-841. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>.

Information about the authors

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

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific Laboratory "Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing" of the Siberian State Industrial University.

V.K. Drobyshev - is a researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing at the Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 06 мая 2024.

The article was received by the editorial board on 30 Oct. 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 06 May 2024.