



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.28

DOI 10.17073/0368-0797-2022-4-254-260

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2296>

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ДЕФЕКТНУЮ СУБСТРУКТУРУ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co – Cr – Fe – Mn – Ni

К. А. Осинцев^{1,2}, В. Е. Громов¹, С. В. Воробьев¹,
Ю. Ф. Иванов^{1,3}, И. А. Панченко¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

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

Аннотация. Электронно-пучковая обработка поверхности является способом модификации материалов, который обеспечивает улучшение механических свойств металлических материалов. За счет высокоскоростного нагрева, испарения, рекристаллизации, а также пластической деформации в поверхности происходит образование дислокаций с высокой плотностью и, как следствие, наблюдается увеличение показателей различных физико-механических свойств, таких как твердость, износостойкость и др. Поскольку в настоящее время высокоэнтропийные сплавы являются относительно новым классом материалов, эффект влияния импульсной электронно-пучковой обработки на дислокационную субструктуру еще не был установлен, в настоящей работе поверхностной обработке с помощью высокоинтенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии 30 Дж/см² был подвергнут неэквивалентный высокоэнтропийный сплав системы Co – Cr – Fe – Mn – Ni, изготовленный с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства. Методом исследования тонких фольг с помощью просвечивающей электронной микроскопии было установлено, что обработка не оказывает влияния на химический состав сплава, однако приводит к серьезным изменениям дислокационной субструктуры. Выявлено немономонотонное изменение скалярной плотности дислокаций, достигающее максимального значения 5,5·10¹⁰ см⁻² на расстоянии 25 мкм от поверхности облучения. Показано, что на этом расстоянии от поверхности формируется неразориентированная ячеистая дислокационная субструктура с размерами ячеек от 400 нм до 600 нм. При дальнейшем удалении от поверхности на расстояние до 45 мкм происходит изменение дислокационной субструктуры от ячеистой к ячеисто-сетчатой. На расстоянии 120 – 130 мкм воздействие высокоинтенсивного импульсного электронного пучка не наблюдается – субструктура соответствует субструктуре исходного сплава с хаотическим распределением дислокаций.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав Co – Cr – Fe – Mn – Ni, проволоочно-дуговое аддитивное производство, электронно-пучковая обработка, дислокация, элементный состав, просвечивающая электронная микроскопия, хрупкий излом

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452).

Для цитирования: Осинцев К.А., Громов В.Е., Воробьев С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Влияние электронно-пучковой обработки на дефектную субструктуру высокоэнтропийного сплава системы Co – Cr – Fe – Mn – Ni // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 4. С. 254–260. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-254-260>

Original article

EFFECT OF HIGH-CURRENT PULSED ELECTRON BEAM TREATMENT ON DEFECT SUBSTRUCTURE OF THE HIGH-ENTROPY ALLOY OF Co – Cr – Fe – Mn – Ni SYSTEM

K. A. Osintsev^{1,2}, V. E. Gromov¹, S. V. Vorob'ev¹,
Yu. F. Ivanov^{1,3}, I. A. Panchenko¹

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

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

Abstract. High-current pulsed electron beam surface treatment is a method of materials modifying, which improves the mechanical properties of metal materials. Due to high-speed heating, evaporation, recrystallization, as well as plastic deformation, dislocations with high density are formed in the surface and, as a result, an increase in indicators of various physical and mechanical properties, such as hardness, wear resistance, etc., is observed. Since currently high-entropy alloys are a relatively new class of materials, the effect of pulsed electron beam treatment on the dislocation substructure has not yet been established. In this work, a non-equiatom high-entropy alloy of the Co – Cr – Fe – Mn – Ni system, made using a wire-arc additive manufacturing, was subjected to surface treatment using a high-current pulsed electron beam with an energy density of 30 J/cm². By the method of studying thin foils using transmission electron microscopy, it was found that the treatment does not affect the chemical composition of the alloy, but leads to serious changes in the dislocation substructure. A nonmonotonic change in the scalar density of dislocations was revealed, reaching a maximum value of $5.5 \cdot 10^{10}$ cm⁻² at a distance of 25 μm from the irradiation surface. It is shown that an undirected cellular dislocation substructure with cell sizes from 400 nm to 600 nm is formed at this distance from the surface. With further distance from the surface at a distance of up to 45 μm, the dislocation substructure changes from cellular to cellular-mesh. At a distance of 120 – 130 μm, the effect of a high-current pulsed electron beam is not observed – the substructure corresponds to the substructure of the initial alloy with a chaotic distribution of dislocations.

Keywords: high-entropy alloy Co – Cr – Fe – Mn – Ni, wire-arc additive manufacturing, deformation, dislocation, electron-beam treatment, elemental composition, transmission electron microscopy

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

For citation: Osintsev K.A., Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. Effect of high-current pulsed electron beam treatment on defect substructure of the high-entropy alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 4, pp. 255–260. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-4-254-260>

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы представляют собой новый вид металлических материалов, состоящих из пяти и более основных компонентов, находящихся в количестве от 5 до 35 % (ат.) [1 – 3]. Для данных видов сплавов характерны такие уникальные свойства, как образование однофазной структуры, сильное искажение кристаллической решетки, а также медленная диффузия [4 – 6]. Одним из исследуемых высокоэнтропийных сплавов является сплав системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni, который способен сохранять гранецентрированную кубическую структуру в широком диапазоне температур, а также обладает хорошим балансом прочности и пластичности [7]. Этот сплав одновременно демонстрирует [8] увеличение прочности при комнатной температуре и вязкости при криогенной температуре (77 К) в результате доминирования двойникования в качестве механизма деформации.

Однако недостатком сплавов системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni является относительно низкий предел текучести при комнатной температуре. В качестве методов по увеличению предела текучести в различных работах были использованы упрочняющие легирующие элементы, такие как титан, кремний, медь, углерод [9 – 11]. Применение различных методов обработки поверхности (среди которых выделяются воздействие ультразвуком [12], азотирование [13], ионная имплантация [14] и борирование [15]) показало эффективность для увеличения усталостной долговечности, прочности и коррозионной стойкости металлических сплавов. Однако эти методы требуют точного контроля химического состава и технологии приготовления, что часто является дорогостоящим и неосуществимым для промышленного применения.

Электронно-пучковая обработка является одним из перспективных методов поверхностной модификации

металлических материалов, приводящих к значительному улучшению механических свойств всего материала за счет оптимизации структуры его поверхностного слоя [16]. Характеристики металлов и сплавов, подвергнутых облучению электронным пучком, могут вырасти в 20 раз, что значительно превышает эффективность традиционных видов обработки [17]. В процессе облучения пучки электронов высокой плотности за чрезвычайно короткий промежуток времени вызывают на расстояниях до 100 мкм от поверхности различные явления, такие как высокоскоростная рекристаллизация, сглаживание поверхности, отжиг [18]. Помимо этого электронно-пучковая обработка может вызывать пластическую деформацию, что приводит к образованию дислокаций с высокой плотностью и значительному улучшению свойств [19, 20].

В настоящее время ограниченное количество работ посвящено исследованию влияния электронно-пучковой обработки на высокоэнтропийные сплавы. Так, в работе [21] показано, что износостойкость, микротвердость, нанотвердость и коррозионные свойства сплава CoCrFeNiMo_{0,2} претерпели значительное увеличение в результате воздействия электронным пучком. Облучение высокоточным электронным пучком сплава NiCoCrAlYSi в работе [22] привело к формированию плотной переплавленной поверхности и удалению исходных дефектов, возникших при лазерной наплавке. Ранее было показано, что электронно-пучковая обработка приводит к гомогенизации химического состава высокоэнтропийного сплава системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni [23].

В связи с тем, что поверхностная модификация высокоэнтропийных сплавов представляет собой актуальное и недостаточно исследованное научное направление, целью настоящей работы являлось изучение влияния электронно-пучковой обработки на дефектную субструктуру сплава системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения образцов системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni в качестве исходного материала были использованы: кобальтовая проволока диаметром 0,47 мм ($\approx 99,9\%$ Co (ат.)); сварочная проволока Autrod 16.95 (приблизительный состав 65,3 % Fe; 19,6 % Cr; 7,3 % Ni; 1,6 % Si; 6,2 % Mn (ат.)), которая была предварительно утонена с диаметра 0,80 до 0,74 мм; хромоникелевая проволока Ni80Cr20 (приблизительный состав 22,5 % Cr; 1,5 % Fe; 72,1 % Ni; 0,8 % Al; 2,9 % Si; 0,2 % Mn (ат.)) диаметром 0,4 мм. Исходные проволоки были скручены с помощью специального скручивающего устройства. Диаметр комбинированного кабеля Co–Cr–Fe–Mn–Ni составил примерно 1,25 мм, длина укладки 10 мм. Изготовление образцов ВЭС осуществлялось послойным нанесением на подложку из стали 12X18H10T с помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства в атмосфере инертного газа ($\approx 99,99\%$ Ar). Использовался следующий режим нанесения слоев: скорость подачи проволоки 13 м/мин, напряжение 22 В, скорость движения горелки 0,1 м/мин. Полученные образцы высокоэнтропийного сплава имели форму параллелепипеда размерами 140×20×30 мм, состояли из семи наплавленных слоев в высоту и четырех слоев в толщину.

Облучение образцов ВЭС импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО». Режим облучения образцов: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см², длительность импульса пучка 50 мкс, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, количество импульсов облучения 3, облучение проводили при остаточном давлении инертного газа (аргон) в рабочей камере установки $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

Дефектная субструктура и распределение химических элементов была изучена методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100, Japan). Объекты исследования (фольги толщиной 150 – 200 нм) для просвечивающего электронного микроскопа были подготовлены методом ионного травления (установка Ion Slicer (EM-09100IS), аргон) пластинок, вырезанных из образца высокоэнтропийного сплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что сплав в исходном состоянии имеет неэквивалентный состав и содержит 15,5 % Cr, 3,1 % Mn, 38,9 % Fe, 24,6 % Co, 17,9 % Ni (ат.). Облучение данного сплава импульсным электронным пучком не привело к существенному изменению элементного состава материала. Методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фольг выявлен следующий элементный состав: 15,5 % Cr, 2,5 % Mn, 37,6 % Fe, 26,3 % Co, 18,1 % Ni (ат.). Методами картирования выявлено однородное распределение указанных элементов в объеме сплава (рис. 1).

Методами просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования дефектной субструктуры, формирующейся при облучении образцов ВЭС импульсным электронным пучком. Показано, что в поверхностном слое формируется неразориентированная

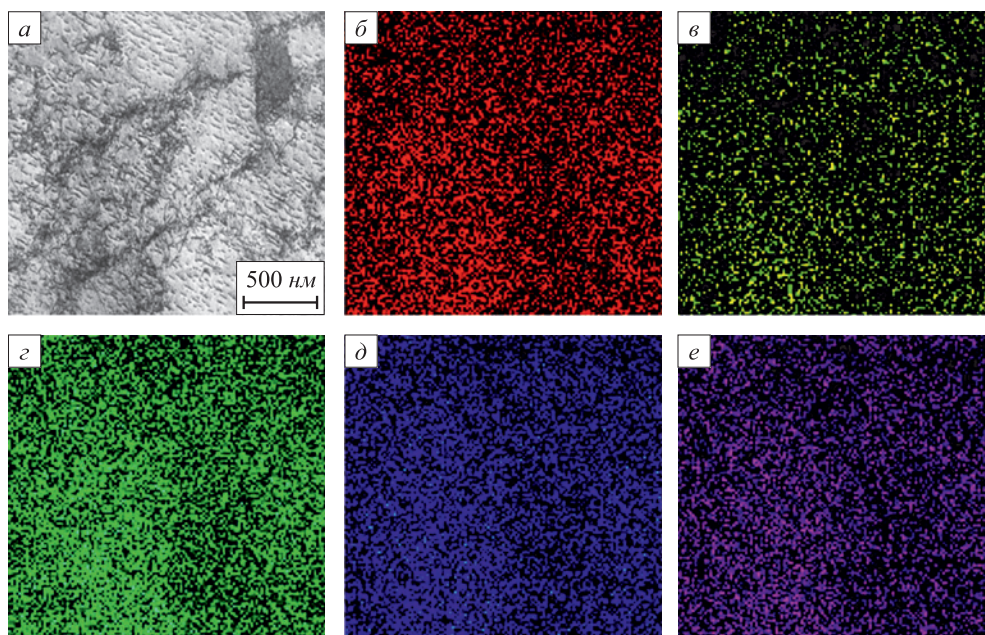


Рис. 1. Электронно-микроскопическое (метод STEM анализа) изображение участка фольги (а) и изображения данного участка фольги, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Cr (б), Mn (в), Fe (г), Co (д), Ni (е)

Fig. 1. Electron microscopic (STEM analysis method) image of the foil section (a) and its images obtained in the characteristic X-ray radiation of Cr (b), Mn (c), Fe (d), Co (d), Ni (e) atoms

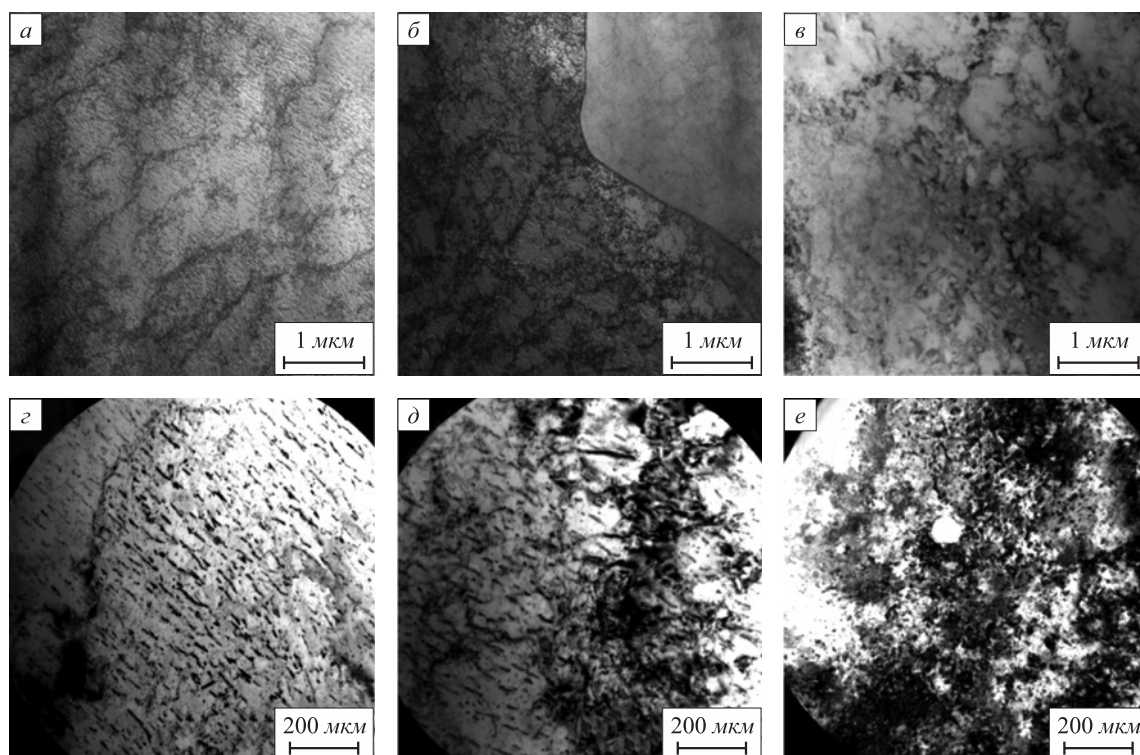


Рис. 2. Дислокационная субструктура поверхности образца (*a, z*) высокоэнтропийного сплава системы Co – Cr – Fe – Mn – Ni, облученного импульсным электронным пучком, а также сплава на расстояниях 25 мкм (*б, д*) и 45 мкм (*в, е*) от поверхности

Fig. 2. Dislocation substructure of the surface of a sample (*a, z*) of a high-entropy alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system irradiated with a pulsed electron beam, as well as an alloy at distances of 25 μm (*б, д*) and 45 μm (*в, е*) from the surface

ячеистая дислокационная субструктура (рис. 2, *a, z*). Размер ячеек изменяется в пределах от 400 нм до 600 нм. В объеме ячеек выявляются хаотически распределенные дислокации. Схожая ячеистая дислокационная субструктура наблюдалась в сплаве NiCoCrAlYSi после обработки электронным пучком [22]. На глубине 25 мкм формируется неразориентированная ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура (рис. 2, *б, д*). При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности облучения до 45 мкм наряду с ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой присутствует субструктура, сформированная дислокациями, распределенными хаотически (рис. 2, *в, е*). На расстоянии 120 – 130 мкм от поверхности облучения дислокационная структура соответствует исходному состоянию и представляет собой хаотически распределенные дислокации (рис. 1, *a*) с плотностью дислокаций приблизительно $2,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3). Анализируя результаты, представленные на рис. 3, можно отметить факт снижения скалярной плотности дислокаций по мере удаления от поверхности облучения.

Зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния от поверхности облучения представлена на рис. 3. Анализируя представленные результаты, можно отметить немонотонное изменение скалярной плотности дислокаций при удалении от поверхности облучения. Одной из причин такой зависимости может быть

существенно неоднородное распределение дислокаций в слое, примыкающем к поверхности облучения. Это связано с формированием ячеистой субструктуры, в которой часть дислокаций расположена в границах ячеек и не учитывается при оценке скалярной плотности дислокаций.

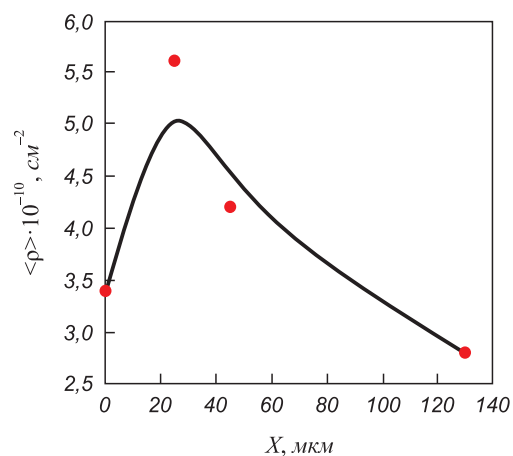


Рис. 3. Зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния от поверхности облучения высокоэнтропийного сплава системы Co – Cr – Fe – Mn – Ni

Fig. 3. Dependence of the scalar dislocation density on the distance from irradiation surface of the high-entropy alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system

Следует отметить отсутствие на электронно-микроскопических изображениях структур ВЭС изгибных контуров экстинкции, что говорит о том, что в материале отсутствуют внутренние поля напряжений, которые привели бы к изгибу-кручению тонкой фольги. Данный факт может свидетельствовать о высоком уровне пластичности исследуемого ВЭС, позволяющем осуществлять релаксацию внутренних полей напряжений путем скользящего дислокаций.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют предположить возможное увеличение твердости поверхностного слоя за счет формирования в обработанной поверхности на расстоянии до 45 мкм субструктуры с более высокой плотностью дислокаций.

Выводы

Исследовано воздействие высокоинтенсивного импульсного электронного пучка (с параметрами: энер-

гия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 30 Дж/см², длительность импульса пучка 50 мкс, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, количество импульсов облучения 3) на дислокационную субструктуру неэквивалентного высокоэнтропийного сплава системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni, изготовленного с помощью технологии проволочно-дугового аддитивного производства. Показано, что облучение импульсным электронным пучком приводит к формированию градиентной дислокационной субструктуры. На расстоянии формируется неразориентированная ячеистая дислокационная субструктура, в объеме ячеек которой наблюдаются хаотически распределенные дислокации. На глубине 25 мкм формируется неразориентированная ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура с наибольшей плотностью дислокаций ~5,5·10¹⁰ см⁻². На глубине 45 мкм наряду с ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой присутствует структура, сформированная распределенными хаотически дислокациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375-377. No. 1-2. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
2. 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. Vol. 6. No. 5. P. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
3. 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>
4. Lim X. Mixed-up metals make for stronger, tougher, stretchier alloys // *Nature*. 2016. Vol. 533. No. 7603. P. 306–307. <https://doi.org/10.1038/533306a>
5. Li Z., Pradeep K.G., Deng Y., Raabe D., Tasan C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off // *Nature*. 2016. Vol. 534. No. 7606. P. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
6. Shaysultanov D., Stepanov N., Malopheyev S., Vysotskiy I., Sanin V., Mironov S., Kaibyshev R., Salishchev G., Zherebtsov S. Friction stir welding of a carbon-doped CoCrFeNiMn high-entropy alloy // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 145. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.063>
7. Zhang T., Xin L., Wu F., Zhao R., Xiang J., Chen M., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical properties of Fe_xCoCrNiMn high-entropy alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2019. Vol. 35. No. 10. P. 2331–2335. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.050>
8. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
9. Yamanaka S., Ikeda K., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy // *Journal of Materials Research*. 2021. Vol. 36. No. 10. P. 2056–2070. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
10. Xian X., Lin L., Zhong Z., Zhang C., Chen C., Song K., Cheng J., Wu Y. Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in
1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375-377, no. 1-2, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
2. 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, vol. 6, no. 5, pp. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
3. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
4. Lim X. Mixed-up metals make for stronger, tougher, stretchier alloys. *Nature*. 2016, vol. 533, no. 7603, pp. 306–307. <https://doi.org/10.1038/533306a>
5. Li Z., Pradeep K.G., Deng Y., Raabe D., Tasan C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*. 2016, vol. 534, no. 7606, pp. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
6. Shaysultanov D., Stepanov N., Malopheyev S., Vysotskiy I., Sanin V., Mironov S., Kaibyshev R., Salishchev G., Zherebtsov S. Friction stir welding of a carbon-doped CoCrFeNiMn high-entropy alloy. *Materials Characterization*. 2018, vol. 145, pp. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.063>
7. Zhang T., Xin L., Wu F., Zhao R., Xiang J., Chen M., Jiang S., Huang Y., Chen S. Microstructure and mechanical properties of Fe_xCoCrNiMn high-entropy alloys. *Journal of Materials Science and Technology*. 2019, vol. 35, no. 10, pp. 2331–2335. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.050>
8. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
9. Yamanaka S., Ikeda K., Miura S. The effect of titanium and silicon addition on phase equilibrium and mechanical properties of CoCrFeMnNi-based high entropy alloy. *Journal of Materials Research*. 2021, vol. 36, no. 10, pp. 2056–2070. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00251-0>
10. Xian X., Lin L., Zhong Z., Zhang C., Chen C., Song K., Cheng J., Wu Y. Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in

- CrMnFeCoNiCu_x high-entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 713. P. 134–140.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.060>
11. Lu Y., Mazilkin A., Boll T., Stepanov N., Zhrebztov S., Salishchev G., Ódor É., Ungar T., Lavernia E., Hahn H., Ivanisenko Y. Influence of carbon on the mechanical behavior and microstructure evolution of CoCrFeMnNi processed by high pressure torsion // *Materialia*. 2021. Vol. 16. Article 101059.
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101059>
 12. Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal surface modification process // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 57. P. 123–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
 13. Meng F., Baker I. Nitriding of a high entropy FeNiMnAlCr alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 645. No. 4. P. 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.021>
 14. Panin S.V., Vlasov I.V., Sergeev V.P., Maruschak P.O., Sunder R., Ovechkin B.B. Fatigue life improvement of 12Cr1MoV steel by irradiation with Zr⁺ ion beam // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 76. P. 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.10.011>
 15. Lindner T., Löbel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 371. P. 389–394.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
 16. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Y.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 125. No. 1-3. P. 49–56.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00604-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00604-0)
 17. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends // *Metals*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/met10091219>
 18. Kononov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 20. Article 4567.
<https://doi.org/10.3390/ma13204567>
 19. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Kononov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 263–270.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
 20. Kononov S.V., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Ivanov Y.F., Ivanova O.V., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue // *Letters on Materials*. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 266–271.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-266-271>
 21. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 410. Article 126911.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
 22. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 881. Article 160651.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160651>
 23. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Kononov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
- CrMnFeCoNiCu_x high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 713, pp. 134–140.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.060>
11. Lu Y., Mazilkin A., Boll T., Stepanov N., Zhrebztov S., Salishchev G., Ódor É., Ungar T., Lavernia E., Hahn H., Ivanisenko Y. Influence of carbon on the mechanical behavior and microstructure evolution of CoCrFeMnNi processed by high pressure torsion. *Materialia*. 2021, vol. 16, article 101059.
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101059>
 12. Listyawan T.A., Lee H., Park N., Lee U. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNi high entropy alloy with ultrasonic nanocrystal surface modification process. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020, vol. 57, pp. 123–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.083>
 13. Meng F., Baker I. Nitriding of a high entropy FeNiMnAlCr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 645, no. 4, pp. 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.021>
 14. Panin S.V., Vlasov I.V., Sergeev V.P., Maruschak P.O., Sunder R., Ovechkin B.B. Fatigue life improvement of 12Cr1MoV steel by irradiation with Zr⁺ ion beam. *International Journal of Fatigue*. 2015, vol. 76, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.10.011>
 15. Lindner T., Löbel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding. *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 371, pp. 389–394.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
 16. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Ivanov Y.F., Markov A.B. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams. *Surface and Coatings Technology*. 2000, vol. 125, no. 1-3, pp. 49–56.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00604-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00604-0)
 17. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 9, pp. 1–20. <https://doi.org/10.3390/met10091219>
 18. Kononov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 20, article 4567.
<https://doi.org/10.3390/ma13204567>
 19. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Kononov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam. *Vacuum*. 2019, vol. 167, pp. 263–270.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
 20. Kononov S.V., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Ivanov Y.F., Ivanova O.V., Gromov V.E. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue. *Letters on Materials*. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 266–271.
<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-3-266-271>
 21. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 410, article 126911.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
 22. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 881, article 160651.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160651>
 23. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., Kononov S., Panchenko I., Vorobyev S. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

ORCID: 0000-0003-1150-6747

E-mail: osincev.ka@ssau.ru

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

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Сергей Владимирович Воробьев, д.т.н., старший научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-3957-0249

E-mail: sparrow1981@mail.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет; ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

ORCID: 0000-0003-0271-5504

E-mail: yufi55@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

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: osincev.ka@ssau.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

Sergei V. Vorob'ev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-3957-0249

E-mail: sparrow1981@mail.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Siberian State Industrial University; Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0003-0271-5504

E-mail: yufi55@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

К. А. Осинцев – анализ данных по применению ВЭС.

В. Е. Громов – концепция статьи, выбор областей применения высокоэнтропийных сплавов, написание первого варианта статьи.

С. В. Воробьев – анализ публикаций по применению ВЭС в энергетике, судостроении и сварных соединений ядерных реакторов.

Ю. Ф. Иванов – анализ работ отечественных и зарубежных исследователей по проблеме применения ВЭС. Написание статьи.

И. А. Панченко – подбор и анализ обзорных статей и монографий, содержащих сведения о последних применениях ВЭС в наукоемких областях.

K. A. Osintsev – analysis of data on the use of high-entropy alloys.

V. E. Gromov – formation of the article concept, choice of application of high-entropy alloys, writing the text.

S. V. Vorob'ev – analysis of publications on the use of high-entropy alloys in power engineering, shipbuilding and welded joints of nuclear reactors.

Yu. F. Ivanov – analysis of works of domestic and foreign researchers on the issue of the use of high-entropy alloys.

I. A. Panchenko – selection and analysis of review articles and monographs containing information on the latest applications of high-entropy alloys in high-tech areas.

Поступила в редакцию 30.11.2021

После доработки 07.12.2021

Принята к публикации 16.12.2021

Received 30.11.2021

Revised 07.12.2021

Accepted 16.12.2021