

Оригинальная статья

УДК 669.017:539.531:536.425

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА AlCrFeCoNi, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2024 г. Л. П. Башченко¹, М. О. Ефимов¹, Ю. А. Шлярова¹, В. Е. Громов¹,
С. В. Коновалов^{1, 2}

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

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

Аннотация. Методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) изготовлены объемные образцы высокоэнтропийного сплава нестехиометрического состава. В работе методами современного физического материаловедения выполнен анализ элементного и фазового составов, дефектной субструктуры и трибологических свойств поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате облучения импульсным электронным пучком с разной плотностью энергии пучка электронов ($10 - 30 \text{ Дж/см}^2$) в среде аргона. Показано, что облучение не зависит от плотности энергии пучка электронов и приводит к фрагментации поверхности сеткой микротрещин, что свидетельствует о повышенной хрупкости исследуемого сплава. Отмечена гомогенизация сплава и формирование субмикро- и нанокристаллической структуры. Толщина модифицированного слоя увеличивается от 0,8 до 20 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 10 до 30 Дж/см². Установлена корреляция изменения нанотвердости и модуля упругости с результатами по измерению микротвердости. Коррелированное уменьшение микро- и нанотвердости и модуля Юнга свидетельствует о релаксации внутренних полей напряжений, сформированных при изготовлении сплава. Обработка электронным пучком незначительно влияет на трибологические свойства, но значительно увеличивает прочность и пластичность материала. Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в сплаве, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см². Условный предел текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, электронный пучок, облучение, структура, свойства, фазовый состав

Для цитирования: Башченко Л.П., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Коновалов С.В. Структура, фазовый состав и свойства высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNi, облученного импульсным электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):129–136. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-129-136](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136)

Original article

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY AlCrFeCoNi ALLOY IRRADIATED WITH A PULSED ELECTRON BEAM

© 2024 L. P. Bashchenko¹, M. O. Efimov¹, Yu. A. Shlyarova¹, V. E. Gromov¹,
S. V. Konovalov^{1, 2}

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

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

Abstract. Volumetric samples of a high-entropy alloy of nonstoichiometric composition were produced by the method of wire-arc additive manufacturing (WAAM). In this work, the methods of modern physical materials science

have been used to analyze the elemental and phase compositions, defective substructure and tribological properties of the HEA surface layer formed as a result of irradiation with a pulsed electron beam with different electron beam energy densities ($10 - 30 \text{ J/cm}^2$) in an argon medium. It is shown that irradiation does not depend on the energy density of the electron beam and leads to fragmentation of the surface by a network of microcracks, which indicates an increased fragility of the alloy under study. The homogenization of the alloy and the formation of a submicro- and nanocrystalline structure are noted. The thickness of the modified layer increases from 0.8 to 20 μm with an increase in the energy density of the electron beam from 10 to 30 J/cm^2 . The correlation of changes in nanohardness and modulus of elasticity with the results of measuring microhardness has been established. The correlated decrease in micro- and nanohardness and Young's modulus indicates relaxation of the internal stress fields formed during the manufacture of the alloy. Electron beam treatment has little effect on tribological properties, but significantly increases the strength and ductility of the material. The highest value of the compressive strength of 2179 MPa was obtained in an alloy treated with an electron beam with an energy density of 30 J/cm^2 . The conditional yield strength for compression was 522 MPa, and the Young's modulus was 257 GPa.

Keywords: high-entropy alloy, electron beam, irradiation, structure, properties, phase composition

For citation: Bashchenko L.P., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A., Gromov V.E., Konovalov S.V. Structure, phase composition and properties of high-entropy AlCrFeCoNi alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):129–136. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-129-136](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136)

Введение

Высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) представляют собой класс новых материалов, состоящих из не менее пяти элементов в неэквиватном (или близком к эквиватному) соотношении, что обеспечивает им (в отличие от традиционных сплавов) уникальные свойства [1]. Концепция ВЭС основана на идее, что высокая энтропия смешения может способствовать образованию стабильных однофазных микроструктур [2], что не противоречит правилу фаз, основанному на законах термодинамики. Эта концепция вызвала беспрецедентный интерес во всем мире к разработке и исследованию ВЭС. Первой работой в этом направлении следует считать исследование [3], в котором атомная концентрация составляющих ВЭС элементов колеблется в пределах от 5 до 35 %. Особенности химического состава и структуры ВЭС приводят к так называемым «основным» эффектам (core effects), которые определяют уникальный комплекс свойств этих материалов [4 – 7]: эффекту высокой энтропии, эффекту сильных искажений кристаллической решетки, эффекту замедленной диффузии и «коктейльному» эффекту. Обобщение обширных оригинальных результатов, разбор и анализ свойств ВЭС, перспективы их применения сделаны в обзорах и монографиях [1; 8; 9].

В последние пять лет несмотря на значительное количество публикаций по ВЭС и существующие при этом серьезные проблемы, рассмотренные в работах [1; 2; 8; 9], намечилось принципиально новое направление в физическом материаловедении высокоэнтропийных сплавов – улучшение свойств поверхности пу-

тем модифицирования различными видами обработки.

Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [10; 11]. Такая обработка обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10^6 K/c) поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основном в объем материала со скоростями $10^4 - 10^9 \text{ K/c}$, в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния [12; 13].

Целью настоящей работы являлся анализ структуры, элементного и фазового составов, дефектной структуры поверхностного слоя высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNi после облучения импульсным электронным пучком.

Методы и принципы исследования

В качестве материала исследования использован ВЭС элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni, полученный с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства WAAM. Облучение системы наплавка – подложка интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛЮ» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов U составляла 18 кэВ; плотность (E_s) энергии пучка электронов $10 - 30 \text{ Дж/см}^2$; длительность (t) импульса пучка электронов 200 мкс; количество (N) импульсов 3; частота (f) следования импульсов $0,3 \text{ c}^{-1}$. Облучение осу-

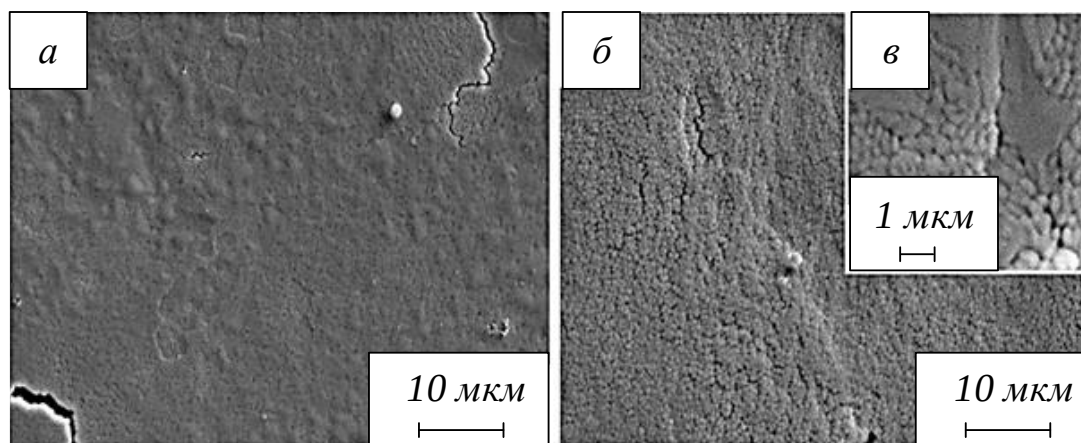


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности ВЭС, облученного импульсным электронным пучком (200 мкс, 3 имп.) при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см²

Fig. 1. Electron microscopic image of the surface structure of the VES irradiated with a pulsed electron beam (200 μ s, 3 imp.) at an electron beam energy density of 30 J/cm²

ществляли в вакууме при давлении p остаточного газа (аргон) в камере установки 0,02 Па.

Исследования элементного и фазового составов проводили методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM 2100F, JEOL) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония). Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере PMT-3 при нагрузке 0,5 Н. Исследования трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pinon Discand Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция).

Основные результаты

Установлено, что независимо от плотности энергии пучка электронов облучение ВЭС сопровождается фрагментацией поверхности образцов сеткой микротрещин. Размеры фрагментов достигают нескольких сотен микрометров, существенно превышая размеры зерен исходного сплава. Очевидно, что микротрещины образуются в результате релаксации упругих напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при высокоскоростном охлаждении, которое наблюдается в условиях облучения импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Релаксация упругих напряжений путем формирования микротрещин характерна для керамических материалов и свидетельствует о повышенной хрупкости исследуемого ВЭС.

Облучение ВЭС импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя сопровождается гомогенизацией материала. Об этом свидетельствует освобождение границ зерен от выделений второй фазы. Увеличение плотности энергии пучка электронов приводит к интенсификации процесса формирования однородного по элементному составу сплава.

Высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя образцов ВЭС сопровождается формированием субмикро- и нанокристаллической структуры (рис. 1).

Существует некоторая вероятность, что облучение сплава импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя может привести к неконтролируемому изменению элементного состава материала. Выполненные методами микрорентгеноспектрального анализа исследования элементного состава поверхностного слоя ВЭС, облученного импульсным электронным пучком, не подтвердили данное опасение.

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры поверхности хрупкого излома образцов ВЭС, модифицированных импульсным электронным пучком. Установлено, что высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя сплава приводит к формированию столбчатой структуры, характерное изображение которой приведено на рис. 2.

Толщина модифицированного слоя (H) закономерным образом увеличивается от 0,8 до 20 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 10 до 30 Дж/см² (табл. 1).

Столбчатая структура сформирована кристаллитами, размеры h которых закономерным образом увеличиваются с ростом плотности энергии пучка электронов (табл. 1).

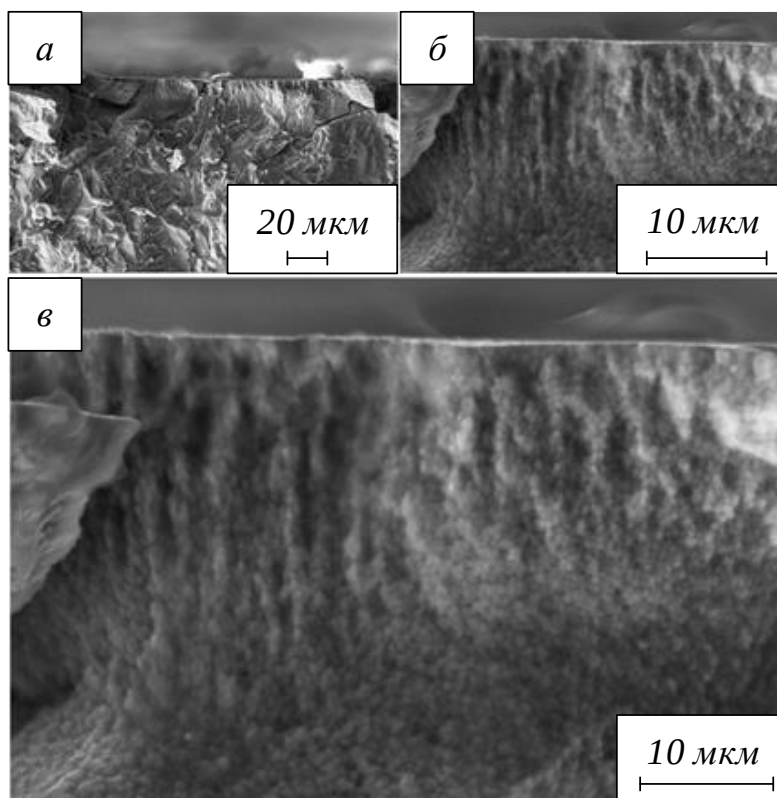


Рис. 2. СЭМ изображение структуры излома ВЭС, обработанного импульсным пучком электронов с плотностью энергии 30 Дж/см² (200 мкс, 3 имп.)

Fig. 2. SEM image of the fracture structure of the VES treated with a pulsed electron beam with an energy density of 30 J/cm² (200 μs, 3 imp.)

Таким образом, такой параметр, как плотность энергии пучка электронов оказывает влияние как на толщину модифицированного слоя, так и на размеры кристаллитов, формирующихся в результате обработки.

Методами микрорентгеноспектрального анализа поперечных шлифов выполнены исследования элементного состава образцов, облученных импульсным электронным пучком. Установлено, что ЭПО приводит к более однородному распределению элементов в обработанном слое. Так, наблюдаемое в необработанном сплаве обогащение объема зерен алюминием и никелем, а также обогащение границ зерен железом и хромом не наблюдается в модифицированном слое. Картирование поперечного сечения образ-

ца в зависимости от расстояния от поверхности показало, что толщина гомогенизированного слоя достигает 4 мкм. При большем увеличении расстояния от поверхности облучения наблюдается характерное для необработанного образца распределение элементов.

Методами энергодисперсионного спектрального анализа определено, что обработанный слой в среднем имеет следующий элементный состав: 39,05 ат. % Al; 4,88 ат. % Co; 7,92 ат. % Cr; 15,9 ат. % Fe; 32,25 ат. % Ni. Эти данные свидетельствуют об увеличении содержания алюминия и соответствующем уменьшении содержания железа, никеля, кобальта и хрома в рассматриваемом слое.

Т а б л и ц а 1

Сравнительные данные столбчатой структуры поверхности в зависимости от плотности энергии пучка электронов

Table 1. Comparative data of the columnar structure of the surface depending on the energy density of the electron beam

Характеристики столбчатой структуры	Значение при плотности энергии пучка электронов, Дж/см ²				
	10	15	20	25	30
<i>H</i> , мкм	0,8 – 1,0	9 – 10	13	13 – 15	20
<i>h</i> , мкм	Не выявлена	0,15 – 0,30	0,30	1,00	2,50 – 3,00

Результаты трибологических испытаний
Table 2. Results of tribological tests

Состояние, плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	Скорость износа, 10 ⁻⁴ мм ³ /(Н·м)	Коэффициент трения
Без обработки	1,4	0,65
10	1,9	0,65
15	2,3	0,67
20	1,4	0,63
25	2,5	0,65
30	1,9	0,63

Установлено, что электронно-пучковая обработка поверхности образцов сплава при различных плотностях энергии пучка электронов привела к уменьшению микротвердости поверхностного слоя независимо от параметров обработки. Значения уменьшились в среднем на 100 HV в обработанном слое относительно объема материала. Наименьшее значение микротвердости наблюдалось при режиме обработки с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см², оно составило на поверхности 368 ± 1 HV. Наибольшее значение микротвердости обработанной поверхности 403 ± 6 HV обнаружено в материале, обработанном с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см². Установлено, что ЭПО приводит к изменению микротвердости поверхностного слоя на глубину до 90 мкм.

Результаты исследования нанотвердости и модуля упругости обработанных образцов выявили корреляцию с данными по изменению микротвердости, а именно, нанотвердость и модуль Юнга поверхностного слоя уменьшаются в среднем на 28 – 30 %. Данный факт свидетельствует о том,

что ЭПО приводит к релаксации внутренних полей напряжений, сформировавшихся в исходном материале при его изготовлении.

Выполненные трибологические испытания образцов в исходном состоянии и после ЭПО в различных режимах показали, что обработка электронным пучком незначительно влияет на коэффициент трения и скорость износа. Скорость износа образца без обработки составляет $1,4 \cdot 10^{-4}$ мм³/(Н·м), а в обработанных электронным пучком – варьируется от $1,4 \cdot 10^{-4}$ до $2,5 \cdot 10^{-4}$ мм³/(Н·м). Коэффициент трения составляет 0,65 для исходных образцов и 0,63 – 0,67 – для модифицированных (табл. 2).

Облучение высокоэнтропийного сплава интенсивным импульсным электронным пучком привело к увеличению прочности и пластичности материала. Так, предел прочности на сжатие увеличился в 1,1 – 1,6 раза (рис. 3). Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в образце сплава, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см². Услов-

σ , МПа

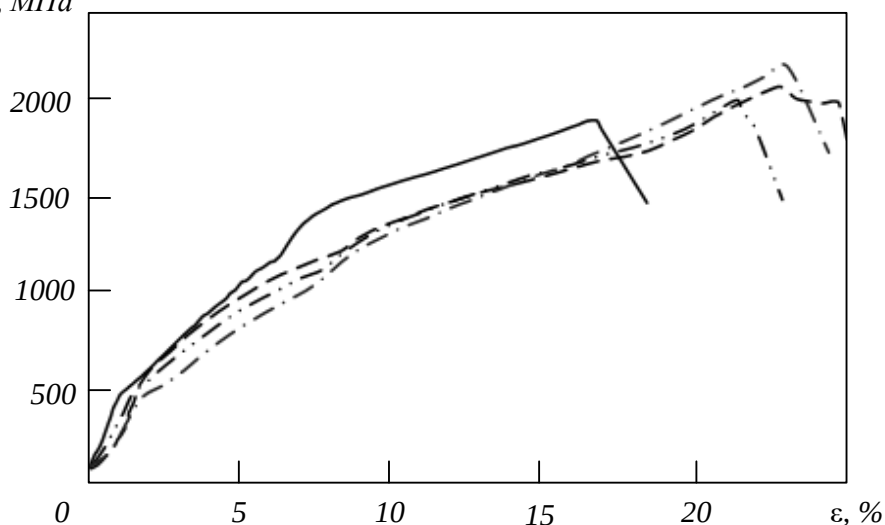


Рис. 3. Диаграммы напряжение – деформация образцов ВЭС в исходном состоянии и обработанных электронным пучком:
— — без ЭПО; - - - - $E_s = 10$ Дж/см²; - · - · - $E_s = 20$ Дж/см²; · · · · $E_s = 30$ Дж/см²

Fig. 3. Stress-strain diagrams of HES samples in the initial state and treated with electron beams:
— — without EPO; - - - - $E_s = 10$ J/cm²; - · - · - $E_s = 20$ J/cm²; · · · · $E_s = 30$ J/cm²

Выявленные при испытаниях на одноосное сжатие механические свойства образцов до и после ЭПО

Table 3. Mechanical properties of samples revealed during uniaxial compression tests before and after the EPOCH

Состояние, плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	E , ГПа	ε , %
Исходный	512 – 523	1361 – 1899	273 – 372	9 – 18
10	522	2078	310	25
20	474	2000	279	23
30	522	2179	257	25

ный предел текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа (табл. 3).

текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа.

Выводы

Осуществлено облучение поверхности образцов ВЭС импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя. Выявлена фрагментация поверхности образцов сеткой микротрещин. Установлено, что облучение ВЭС импульсным электронным пучком сопровождается освобождением границ зерен от выделений второй фазы, что свидетельствует о гомогенизации материала. Фазовый состав сплава при этом не изменяется. Показано, что высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя образцов ВЭС сопровождается формированием столбчатой структуры, имеющей субмикро- и нанокристаллическое строение. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что элементный состав поверхностного слоя сплава практически не зависит от плотности энергии пучка электронов и в пределах ошибки измерения соответствует элементному составу исходного материала. Установлено, что электронно-пучковая обработка приводит к снижению микротвердости поверхностного слоя сплава толщиной до 90 мкм, что может быть обусловлено релаксацией внутренних полей напряжений, сформировавшихся в исходном материале при его изготовлении. Показано, что обработка ВЭС импульсным электронным пучком незначительно влияет на коэффициент трения и скорость износа материала. Выявлено, что облучение высокоэнтروпийного сплава интенсивным импульсным электронным пучком приводит к увеличению прочности и пластичности материала. Предел прочности на сжатие увеличился в 1,1 – 1,6 раза. Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в сплаве, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см². Условный предел

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Structure and properties of high-entropy alloys. *Advanced structured materials*. Vol. 107 / V.E. Gromov, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. Springer; 2021:110.
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841.
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>. EDN: REFBUL.
3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303.
<https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
5. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16:4749–4768.
<https://doi.org/10.3390/e16094749>
6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater*. 2017;122:448–511.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22.
<https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
8. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019:374.
9. Zhang Y. High-Entropy Materials: A brief introduction. Singapore: Springer Nature,

- 2019;159. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*. 2020;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
 11. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Семин А.П. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2022:230.
 12. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
 13. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam. *Metals*. 2021;11(8):1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
- ### REFERENCES
1. Structure and properties of high-entropy alloys. Advanced structured materials. Vol. 107 / V.E. Gromov, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. Springer, 2021:110.
 2. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of metals and metallurgy*. 2020;121(8):807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>. EDN: REFBUL. (In Russ.).
 3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
 4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
 5. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16:4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
 6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater*. 2017;122:448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
 7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
 8. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019:374.
 9. Zhang Y. High-Entropy Materials: A brief introduction. Singapore: Springer Nature, 2019:159. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
 10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*. 2020;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
 11. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyakhova Yu.A., Semin A.P. Structure and properties of high-entropy alloys. Novokuznetsk: IC SibGIU, 2022:230. (In Russ.).
 12. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
 13. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam. *Metals*. 2021;11(8):1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>

Сведения об авторах

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1878-909X

SPIN-код: 5942-8145

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

E-mail: moefimov@mail.ru.

Юлия Андреевна Шлярова, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rubannikova96@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5677-1427

SPIN-код: 7791-1310

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет; профессор кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Information about the authors

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145

Mikhail O. Efimov, Ph.D. candidate, Department of Natural Sciences named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: moefimov@mail.ru.

Yulia A. Shliarova, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: rubannikova96@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5677-1427
SPIN-код: 7791-1310

Victor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Department of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Sergej V. Konovalov, DDr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University; Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara State Aerospace University
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.10.2024

После доработки 24.10.2024

Принята к публикации 28.10.2024

Received 15.11.2024

Revised 24.10.2024

Accepted 28.10.2024