



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:539.531

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-427-433

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2324>

ФРАКТОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CrMnFeCoNi ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

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

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

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

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

Аннотация. В последнее десятилетие внимание ученых в области физического материаловедения привлечено к изучению высокоэнтропийных сплавов. По технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) получен высокоэнтропийный сплав (ВЭС) неэквивалентного состава. В двух состояниях (исходном/после изготовления и после электронно-пучковой обработки (ЭПО)) были проанализированы деформационные кривые, полученные на установке Instron 3369 при одноосном растяжении со скоростью 1,2 мм/мин при комнатной температуре. Электронно-пучковую обработку проводили с целью выявления ее влияния на структурно-фазовые состояния и механические свойства. Такая обработка приводит к снижению прочностных и пластических свойств ВЭС. С помощью сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 выполнен анализ структуры поверхности разрушения и приповерхностной зоны. Выявлены зависимости предела прочности и относительного удлинения до разрушения от параметров ЭПО. Прочность и пластичность немонотонно снижаются с ростом плотности энергии пучка электронов в диапазоне 10 – 30 Дж/см² при постоянных значениях длительности, частоты и количества импульсов. Наряду с ямочным характером излома выявлено наличие микропор, микрорасслоений. Исследование поверхности разрушения ВЭС после ЭПО кроме областей с вязким механизмом разрушения выявило области с полосовой (пластинчатой) структурой. При плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см² площадь такой структуры составляет 25 %, она немонотонно растет до 65 % при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см². Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что значительно меньше размера ямок отрыва остальной части образцов ВЭС. После ЭПО толщина расплавленного слоя изменяется в пределах 0,8 – 5,0 мкм и возрастает с ростом плотности энергии пучка электронов. Электронно-пучковая обработка приводит к образованию ячеек кристаллизации, размеры которых изменяются в пределах 310 – 800 нм при росте плотности энергии пучка электронов от 15 до 30 Дж/см². Высказано предположение, что образующиеся при ЭПО дефекты в поверхностных слоях могут быть одной из причин снижения прочности и пластичности ВЭС.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав CrMnFeCoNi, электродуговая аддитивная технология, импульсный электронный пучок, испытание на растяжение, структура поверхности разрушения

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-19-00452 (получение высокоэнтропийного сплава, проведение электронно-пучковой обработки и механических испытаний) и в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013) (фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава).

Для цитирования: Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 427–433. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>

Original article

FRACTOGRAPHY OF FRACTURE SURFACE OF CRMNFECONI HIGH-ENTROPY ALLOY AFTER ELECTRON-BEAM PROCESSING

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

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

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

³ Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

Abstract. In the past decade the attention of scientists in the field of physical materials science is attracted to studying the high-entropy alloys. By the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM) a high-entropy alloy (HEA) of a nonequiatomic composition was obtained. Deformation curves obtained under uniaxial tension at a rate of 1.2 mm/min at room temperature using Instron 3369 unit were analyzed in two states: initial/after fabrication and after electron-beam treatment (EBT). EBT was conducted to detect its influence on structural-phase states and mechanical properties. The EBP leads to a decrease in strength and plastic properties of the HEA. By means of scanning electron microscope LEO EVO 50, analysis of structure of fracture surface and the near-surface zone was performed. Dependences of the ultimate strength and relative elongation to failure on EBT parameters were revealed, and it was shown that values of strength and plasticity decrease nonmonotonically with an increase in electron beam energy density in the range $E_S = 10 - 30 \text{ J/cm}^2$ at constant values of duration, frequency, and number of pulses. Along with a pit character of the fracture a presence of micropores and microlayering was detected. Investigation of the HEA's fracture surface after EBP except for areas with a ductile fracture mechanism revealed the regions with a band (lamellar) structure. At $E_S = 10 \text{ J/cm}^2$, the area of such structure is 25 %; it increases nonmonotonically to 65 % at $E_S = 30 \text{ J/cm}^2$. The diameter of pits of detachment in fracture bands varies in the limits of 0.1 – 0.2 μm , which is considerably less than that in the remainder of the HEA samples. After EBP the thickness of the molten layer varies in the limits of 0.8 – 5.0 μm and grows with an increase in the energy density of electron beam. EBT leads to generation of crystallization cells, the sizes of which change within the range 310 – 800 nm as E_S increases from 15 to 30 J/cm^2 . It is suggested that the defects being formed in surface layers in EBP may be the reason for decreasing the HEA's maximum values of strength and plasticity.

Keywords: CrMnFeCoNi high-entropy alloy, wire arc additive manufacturing, pulsed electron-beam, tensile tests, fracture surface structure

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452) (fabrication of the high-entropy alloy, electron beam treatment and conducting of the mechanical tests) and within the framework of the state assignment (subject code 0809-2021-0013) (fractography of the fracture surface of the high-entropy alloy).

For citation: Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V., Panchenko I.A. Fractography of fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 427–433. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически ориентированных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов, обладающих комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств, и технологий их получения [1 – 4].

В последние годы внимание ученых привлекает новая система сплавов, известная как высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) [5 – 8]. В отличие от традиционных высокоэнтропийные сплавы состоят из пяти и более основных элементов с содержанием от 5 до 35 % (ат.) [9 – 14]. Особенность высокоэнтропийных сплавов заключается в том, что атомы всех элементов считаются атомами растворенного вещества, вызывают деформацию кристаллической структуры и улучшают термодинамическую стабильность свойств, связанных с различиями в атомных радиусах компонентов. Это приводит к высокой энтропии системы и возможности дальнейшего производства материалов с уникальными свойствами, которые невозможно получить традиционными методами микролегирования [15 – 18].

Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рассмотрены в аналитических обзорах и монографиях [1, 19 – 23], где описаны микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Ранее в работах [1, 22] было показано, что из-за использования различных методов получения ВЭС, содержащих химические элементы с разными атомными радиусами, возможно образование наноструктур и даже аморфного состояния.

В настоящее время разрабатываются практически все типы таких сплавов (конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионностойкие, с особыми магнитными и электрическими свойствами) и соединений (карбиды, нитриды, оксиды, бориды, силициды) [16]. Улучшение свойств материалов может быть достигнуто путем обработки поверхности концентрированными потоками энергии. Основной особенностью упрочнения материалов концентрированными потоками энергии (в сравнении с методами традиционной термической и химико-термической обработки) является наноструктурирование их поверхностных слоев. Это означает снижение масштабного уровня локализации пластической деформации поверхности, что приводит к более равномерному распределению упругих напряжений вблизи нее при воздействии эксплуатационных факторов. Повышение прочности и пластичности при этом будет обусловлено уменьшением числа субмикротрещин в поверхностных слоях.

Среди многочисленных методов поверхностной модификации поверхности и ее упрочнения особое место занимает электронно-пучковая обработка (ЭПО) [24, 25], которая обеспечивает сверхвысокие (до 10^6 K/c) скорости нагрева поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями $10^4 - 10^9 \text{ K/c}$. В результате в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния.

Целью настоящей работы является анализ поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi, изготовленного методом электродуговой аддитивной технологии и подвергнутого деформации растяжением в исходном и в облученном импульсным электронным пучком состоянии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокоэнтропийный сплав неэквивалентного состава CrMnFeCoNi был изготовлен методом электродуговой аддитивной технологии (WAAM) [22]. Для получения образцов в качестве исходного материала была использована трехжильная проволока, состоящая из чистой ($\approx 99,9\%$ Co (здесь и далее атом.)) кобальтовой проволоки диаметром 0,47 мм; сварочной проволоки Autrod 16.95 (65,3 % Fe, 19,6 % Co, 7,3 % Ni, 1,6 % Si, 6,2 % Mn), которая была предварительно утонена в диаметре с 0,80 до 0,74 мм; хромоникелевой проволоки Ni80Cr20 (22,5 % Cr, 1,5 % Fe, 72,1 % Ni, 0,8 % Al, 2,9 % Si, 0,2 % Mn) диаметром 0,4 мм. Исходные проволоки были скручены с помощью специального скручивающего устройства. Детальная методика электродуговой аддитивной технологии получения ВЭС системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni с указанием режима нанесения слоев и их размеров представлена в работе [22]. Механические испытания были проведены в соответствии

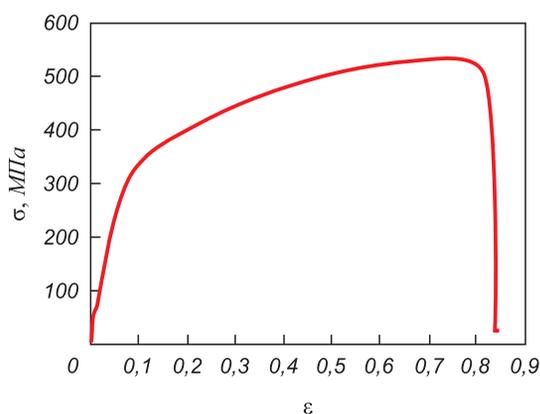


Рис. 1. Деформационная кривая, полученная при одноосном растяжении ВЭС в исходном состоянии

Fig. 1. Deformation curve obtained by HEA uniaxial stretching in the initial state

с ГОСТ 1497 – 84 [26]. Образцы для исследований вырезали из массивной заготовки методами электроэрозионной резки. Размеры образцов перед испытаниями: толщина 1,05 мм; ширина 4,4 мм; длина рабочей части 8,0 мм. Часть образцов облучали с двух сторон (рабочая часть) в среде аргона на установке «СОЛЮ», разработанной и изготовленной в «Институте сильноточной электроники СО РАН» [27] по режимам: плотность энергии пучка электронов $E_s = 10 \div 30$ Дж/см², длительность импульса пучка 50 мкс, количество импульсов 3, частота 0,3 с⁻¹. Запись деформационных кривых при растяжении со скоростью 1,2 мм/мин проводили на установке Instron 3369. С помощью сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 анализировали структуру поверхности разрушения и поверхностных слоев.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сплав в исходном состоянии имеет неэквивалентный состав и содержит 15,5 % Cr, 3,1 % Mn, 38,9 % Fe, 24,6 % Co, 17,9 % Ni. Облучение данного сплава импульсным электронным пучком не привело к существенному изменению элементного состава материала. Методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фольг выявлен следующий элементный состав поверхностного слоя: 15,5 % Cr, 2,5 % Mn, 37,6 % Fe, 26,3 % Co, 18,1 % Ni.

Типичная деформационная кривая при растяжении ВЭС в исходном состоянии приведена на рис. 1. Отчетливо видно, что испытываемые образцы обладают высокой (более 80 %) пластичностью и прочностью при разрыве (более 500 МПа).

Электронно-микроскопический анализ поверхности разрушения ВЭС наряду с вязким ямочным характером излома (рис. 2, а) выявил присутствие в материале микропор, микрорасслоений и пустот (рис. 2, б). Весьма часто указанные дефекты материала располагаются на изломе в виде протяженных полос. Можно предпо-

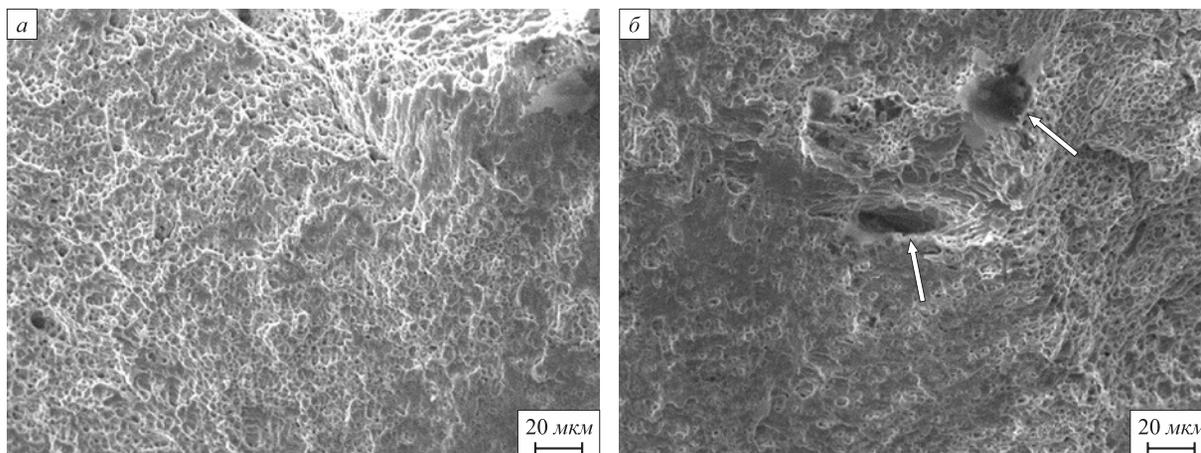


Рис. 2. Поверхность разрушения (а) и микропоры (б), формирующиеся при разрушении ВЭС

Fig. 2. Fracture surface (a) and micropores (b) formed during the HEA fracture

ложить, что такое расположение дефектов обусловлено методом изготовления объемного материала.

Двухстороннее облучение рабочей поверхности образцов для растяжения приводит к снижению прочностных и пластических свойств ВЭС. Предельные значения прочности и пластичности облученных образцов изменяются коррелированным образом соответственно результатам, приведенным на рис. 3.

Исследования поверхности разрушения образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком, выявили наличие наряду с областями, разрушенными по вязкому механизму, областей материала, при разрушении которых формируется полосовая (пластинчатая) структура.

Полосы разрушения в большинстве случаев пересекают образец от верхней до нижней кромки и располагаются под углом 90 или 45° к поверхности образца. Разрушение образца в полосах также протекает по вязкому механизму. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца.

Выполненные исследования показали, что в образце, не облученном импульсным электронным пучком, полосы разрушения материала не формируются. В облученном сплаве размер области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой структуры, увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов, а именно, при $E_s = 10$ Дж/см² области с полосовой структурой занимают примерно 25 % площади излома, при $E_s = 30$ Дж/см² – примерно 65 %. Можно предположить, что формирование полосовой структуры при разрушении ВЭС является одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии (рис. 3).

Облучение металлов и сплавов импульсным электронным пучком, как правило, приводит к формирова-

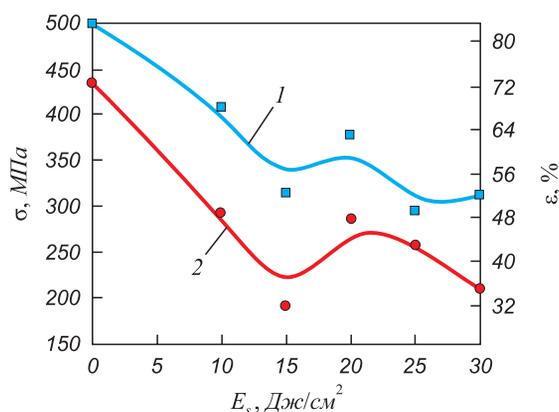


Рис. 3. Зависимость предела прочности (1) и относительного удлинения (2) до разрушения от плотности энергии пучка электронов

Fig. 3. Dependence of the tensile strength (1) and elongation (2) before fracture on electron beam energy density

нию в поверхностном слое образца структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации [23 – 25]. При $E_s = 10$ Дж/см² поверхностный слой ВЭС не плавится. Дальнейшее увеличение E_s в диапазоне 15 – 30 Дж/см² приводит к росту размера ячеек кристаллизации в интервале 310 – 800 нм.

Исследования поверхности разрушения образцов ВЭС позволили оценить толщину расплавленного слоя и рассмотреть состояние пограничного (расплав – твердое тело) слоя, формирующегося при высокоскоростной кристаллизации материала, реализующейся в результате облучения импульсным электронным пучком. При плотности энергии пучка электронов 15 Дж/см² толщина расплавленного слоя составляет 0,8 мкм, а при $E_s = 30$ Дж/см² – 5 мкм.

Размеры кристаллитов слоя практически совпадают с размерами ячеек кристаллизации. Модифицированный электронным пучком объем ВЭС имеет двухслойное строение (рис. 4). На расстоянии примерно до 4 мкм

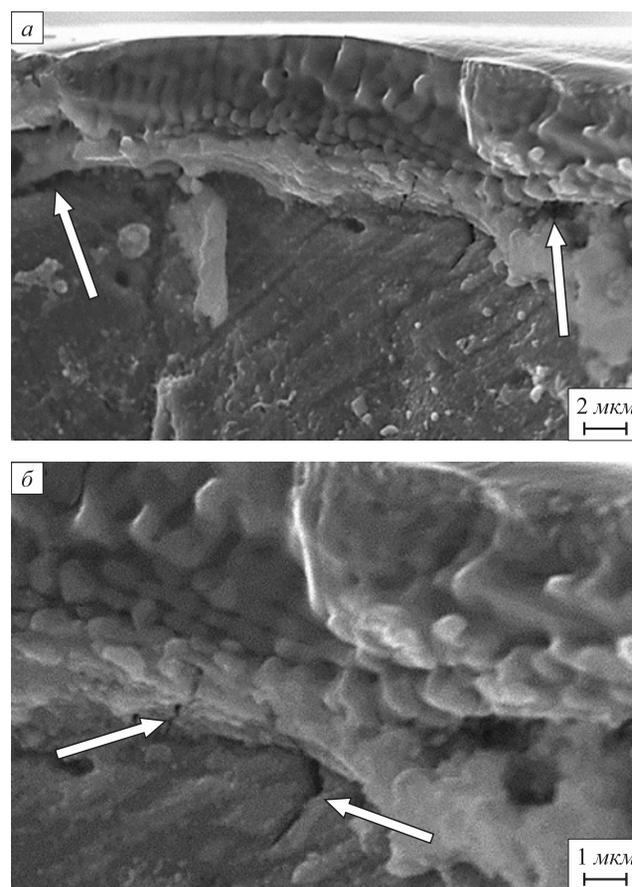


Рис. 4. Структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации, формирующаяся в поверхностном слое ВЭС при облучении импульсным электронным пучком при $E_s = 30$ Дж/см² (стрелками на поз. а обозначены микропоры, на поз. б – микротрещины)

Fig. 4. Structure of high-speed cellular crystallization formed in the HEA surface layer when irradiated with a pulsed electron beam at $E_s = 30$ J/cm² (on a – arrows indicate micropores, on б – microcracks)

от поверхности (первый слой) обнаружены микропоры (рис. 4, а), а на расстоянии примерно 6 мкм (граница второго слоя с подложкой) – микропоры и микротрещины, расположенные преимущественно перпендикулярно к поверхности образца (рис. 4, б). Можно предположить, что дефекты, выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях, формируются в результате упругих напряжений, которые возникают при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Такие дефекты также могут быть причиной снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

Выводы

Установлено, что образцы ВЭС CrMnFeCoNi в исходном состоянии обладают высокой пластичностью (относительное удлинение до разрушения более 80 %) и прочностью (предел прочности более 500 МПа). Разрушение исходных и облученных образцов ВЭС протекает по вязкому механизму. Электронно-пучковая обработка рабочей поверхности приводит к снижению параметров прочности и пластичности ВЭС. В диапазоне плотности энергии пучка электронов 10 – 30 Дж/см²

предел прочности и относительное удлинение до разрушения немонотонно уменьшаются. При разрушении ВЭС на поверхности образуется полосовая структура, площадь которой достигает 65 % при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см². Разрушение образцов в полосах также протекает по вязкому механизму. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца. При плотности энергии пучка электронов более 15 Дж/см² поверхностный слой начинает расплавляться, его толщина достигает 5 мкм при $E_S = 30$ Дж/см². Фрактографический анализ поверхностного слоя разрушения показал его разделение на два слоя, в которых имеются микропоры и микротрещины, расположенные перпендикулярно поверхности материала. Высказано предположение, что выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях дефекты формируются в результате упругих напряжений, возникающих при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Данные дефекты могут быть одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 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>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. No. 9. P. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 139. P. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review // *Metals and Materials International*. 2019. Vol. 26. P. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
- Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 478. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
- Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al_xCoCrFeNi high entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 733. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
- Jian R., Wang L., Zhou S., Zhu Y., Liang Y.-J., Wang B., Xue Y. Achieving fine-grain tungsten heavy alloys by selecting a high entropy alloy matrix with low W grain growth rate // *Materials Letters*. 2020. Vol. 278. Article 128405. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128405>
- Hou L., Hui J., Yao Y., Chen J., Liu J. Effects of Boron Content on microstructure and mechanical properties of AlFeCoNiB_x high
- 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, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 9, pp. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, vol. 139, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review. *Metals and Materials International*. 2019, vol. 26, pp. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
- Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 478, pp. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
- Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 733, pp. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
- Jian R., Wang L., Zhou S., Zhu Y., Liang Y.-J., Wang B., Xue Y. Achieving fine-grain tungsten heavy alloys by selecting a high entropy alloy matrix with low W grain growth rate. *Materials Letters*. 2020, vol. 278, article 128405. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128405>
- Hou L., Hui J., Yao Y., Chen J., Liu J. Effects of Boron Content on microstructure and mechanical properties of AlFeCoNiB_x high

- entropy alloy prepared by vacuum arc melting // *Vacuum*. 2019. Vol. 164. P. 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.019>
9. Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles // *Intermetallics*. 2020. Vol. 127. Article 106983. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106983>
 10. Xu Y., Li C., Huang Z., Chen Y., Zhu L. Microstructure evolution and mechanical properties of FeCoCrNiCuTi_{0.8} high-entropy alloy prepared by directional solidification // *Entropy*. 2020. Vol. 22. No. 7. Article 786. <https://doi.org/10.3390/e22070786>
 11. Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo_{0.5}NbTiV_{0.5}Si_x high entropy composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 694. P. 869–876. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014>
 12. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating // *Optik*. 2019. Vol. 198. Article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
 13. Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.O., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the CrMnFeCoNi₂Cu high entropy alloy // *Low Temperature Physics*. 2020. Vol. 46. Article 958. <https://doi.org/10.1063/1.50001720>
 14. Надутов В.М., Волосевич П.Ю., Прошак А.В., Панарин В.Е., Свавильный Н.Е. Структура ионно-плазменных покрытий из высокоэнтропийного сплава AlFeNiCoCuCr // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39. № 11. С. 1525–1545.
 15. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 248–253. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253>
 16. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
 17. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cu–Fe–Ni–Si // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 1. С. 42–50. <https://doi.org/10.7868/S001532301610003X>
 18. Шайсултанов Д.Г., Степанов Н.Д., Салищев Г.А., Тихоновский М.А. Влияние термической обработки на структуру и твердость высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV_x (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1) // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 6. С. 610–621. <https://doi.org/10.7868/S0015323017060080>
 19. 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>
 20. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
 21. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
 22. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer, Advanced Structured Materials, 2021. Vol. 107. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
 23. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А. Эволюция структуры AlCoCrFeNi высокоэнтропийного сплава при облучении импульсным электронным пучком // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 12. С. 1971–1974. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51762.205-21>
 24. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies // entropy alloy prepared by vacuum arc melting. *Vacuum*. 2019, vol. 164, pp. 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.019>
 9. Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles. *Intermetallics*. 2020, vol. 127, article 106983. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106983>
 10. Xu Y., Li C., Huang Z., Chen Y., Zhu L. Microstructure evolution and mechanical properties of FeCoCrNiCuTi_{0.8} high-entropy alloy prepared by directional solidification. *Entropy*. 2020, vol. 22, no. 7, article 786. <https://doi.org/10.3390/e22070786>
 11. Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo_{0.5}NbTiV_{0.5}Si_x high entropy composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 694, pp. 869–876. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014>
 12. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating. *Optik*. 2019, vol. 198, article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
 13. Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.O., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the CrMnFeCoNi₂Cu high entropy alloy. *Low Temperature Physics*. 2020, vol. 46, article 958. <https://doi.org/10.1063/1.50001720>
 14. Nadutov V.M., Volosevich P.Yu., Proshak A.V., Panarin V.E., Svaivil'nyi N.E. Structure of ion-plasma coatings from AlFeNiCoCuCr high-entropy alloy. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2017, vol. 39, no. 11, pp. 1525–1545. (In Russ.).
 15. Rempel' A.A., Gel'chinskii B.R. High-entropy alloys: preparation, properties and practical application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3-4, pp. 248–253. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253>
 16. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20080098>
 17. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al–Cu–Fe–Ni–Si alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 1, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1134/S0031918X16100033>
 18. Shaysultanov D.G., Stepanov N.D., Salishchev G.A., Tikhonovskii M.A. Effect of heat treatment on the structure and hardness of high-entropy alloys CoCrFeNiMnV_x (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1). *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 6, pp. 579–590. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17060084>
 19. 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>
 20. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
 21. Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
 22. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer, Advanced Structured Materials, 2021, vol. 107, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
 23. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V., Shlyarova Yu.A. Evolution of the structure of AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021, vol. 91, no. 12, pp. 1971–1974. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51762.205-21>
 24. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Kononov S.V., Shliarova 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. Vol. 21. No. 3. P. 345–362.
<https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>

25. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.E., Kononov S.V. *Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams*. Cambridge CISP Ltd, 2015. 272 p.
26. ГОСТ 1497 – 84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.
27. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. 2008. № 5. С. 60–70.

Progress in Physics of Metals. 2020, vol. 21, no. 3, pp. 345–362.
<https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>

25. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.E., Kononov S.V. *Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams*. Cambridge CISP Ltd, 2015, 272 p.
26. *GOST 1497 – 84. Metals. Tensile test methods*. Moscow: Standartinform, 2005, 24 p. (In Russ.).
27. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of cermet and ceramic materials during pulsed electron-beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет; главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Кирилл Александрович Осинцев, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1150-6747
E-mail: kirilloss@yandex.ru

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

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующая лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-1631-9644
E-mail: i.r.i.ss@yandex.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

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Siberian State Industrial University; Chief Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-0271-5504
E-mail: yufi55@mail.ru

Kirill A. Osintsev, Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1150-6747
E-mail: kirilloss@yandex.ru

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

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.r.i.ss@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

V. E. Gromov – анализ фрактографии поверхности разрушения и механических свойств высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки.

Yu. F. Ivanov – электронно-микроскопические исследования поверхности разрушения ВЭС.

K. A. Osintsev – изготовление высокоэнтропийного сплава и образцов для исследования, снятие деформационных кривых и анализ механических свойств.

S. V. Vorob'ev – анализ публикаций по применению ВЭС.

I. A. Panchenko – количественная оценка результатов фрактографии поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки, написание варианта статьи.

V. E. Gromov – analysis of fractography of the fracture surface and mechanical properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing.

Yu. F. Ivanov – electron microscopic studies of the destruction surface of wind turbines.

K. A. Osintsev – production of a high-entropy alloy and samples for the research, design of deformation curves and analysis of mechanical properties.

S. V. Vorob'ev – analysis of publications on the use of wind turbines.

I. A. Panchenko – quantitative evaluation of the results of fractography of the fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing, writing the text.

Поступила в редакцию 20.12.2021
 После доработки 14.01.2022
 Принята к публикации 19.01.2022

Received 20.12.2021
 Revised 14.01.2022
 Accepted 19.01.2022