

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.010

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-Ni, ОБРАБОТАННОГО
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ****Кирилл Александрович Осинцев¹, Сергей Валерьевич Коновалов^{2†},
Юрий Федорович Иванов³, Сергей Васильевич Воронин⁴, Иван Иванович Левин⁵,
Владислав Сергеевич Данилушкин⁶, Виктор Евгеньевич Громов⁷,
Ирина Алексеевна Панченко⁸**^{1, 4, 5, 6} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия^{2, 7, 8} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия³ Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия¹ osincev.ka@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>² ksv@ssau.ru[†], <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>³ yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>⁴ voronin.sv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4370-9832>⁵ vanechek.nmr@mail.ru⁶ vladislavdan@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4013-413X>⁷ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>⁸ i.r.i.ss@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

Аннотация. В работе проведено конечно-элементное моделирование процесса одноосного нагружения сжатия и определено напряженно-деформированное состояние высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного с помощью электронного пучка с плотностью энергии от 10 до 30 Дж/см². Методом сканирующей силовой зондовой микроскопии проведено измерение модуля упругости в поперечном сечении образцов на различном расстоянии от обработанной поверхности. Полученные значения модуля упругости использовались для задания свойств в конечно-элементной модели. Установлено, что с увеличением значения плотности энергии пучка электронов модуль упругости уменьшается на 21 % при 10 Дж/см², на 30 % при 20 Дж/см² и на 44 % при 30 Дж/см², по сравнению с исходным материалом. Результаты конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния высокоэнтропийного сплава после электронно-пучковой обработки продемонстрировали уменьшение значения внутренних напряжений в обработанном слое, возникающих при одноосном сжатии, до 32 % при 20 Дж/см². Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что повышение предела прочности и пластичности исследуемого высокоэнтропийного сплава, установленное в предыдущей работе, может быть обусловлено наличием более вязкого поверхностного слоя.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, высокоэнтропийный сплав, напряженно-деформированное состояние, электронно-пучковая обработка, Al-Co-Cr-Fe-Ni, сканирующая зондовая микроскопия, модуль упругости.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-19-00452.

Для цитирования: Осинцев К.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Воронин С.В., Левин И.И., Данилушкин В.С., Громов В.Е., Панченко И.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 376–383. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.010.

Original article

STRESS-STRAIN STATE MODELLING OF THE Al-Co-Cr-Fe-Ni HIGH-ENTROPY ALLOY SYSTEM AFTER ELECTRON BEAM TREATMENT

Kirill A. Osintsev¹, Sergey V. Konovalov^{2†}, Yurii F. Ivanov³, Sergey V. Voronin⁴, Ivan I. Levin⁵, Vladislav S. Danilushkin⁶, Viktor E. Gromov⁷, Irina A. Panchenko⁸

^{1, 4, 5, 6} Samara National Research University, Moskovskoe shosse Str., 34, Samara, 443086, Russia

^{2, 7, 8} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

³ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskii Av., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

¹ osincev.ka@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1150-6747>

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

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

⁴ voronin.sv@ssau.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4370-9832>

⁵ vanechek.nmr@mail.ru

⁶ vladislavdan@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4013-413X>

⁷ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

⁸ i.r.i.ss@yandex.com, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

Abstract. In this paper, we carried out finite element modeling of the stress-strain state of a process of uniaxial compression of a high-entropy alloy of the Al-Co-Cr-Fe-Ni system treated with an electron beam with energy densities from 10 to 30 J/cm². The elastic modulus in the cross section of the samples was measured by scanning force probe microscopy at different distances from the treated surface. The obtained values of the elastic modulus were used to set the properties in the finite element model. It was found that with an increase in the electron beam energy density, the modulus of elasticity decreases by 21 % at 10 J/cm², by 30% at 20 J/cm² and by 44 % at 30 J/cm², compared with the initial material. The results of finite element modeling of the stress-strain state of a high-entropy alloy after electron-beam processing demonstrated a decrease in the value of internal stresses in the treated layer that occur during uniaxial compression by up to 32 % at 20 J/cm². The obtained results allow us to conclude that the increase in the strength and plasticity of the investigated high-entropy alloy, established in the previous study, may be due to the presence of a more viscous surface layer.

Keywords: finite element modeling, high-entropy alloy, stress-strain state, electron beam treatment, Al-Co-Cr-Fe-Ni, scanning probe microscopy, elastic modulus.

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

For citation: Osintsev, K. A., Konovalov, S. V., Ivanov, Yu. F., Voronin, S. V., Levin, I. I., Danilushkin, V. S., Gromov, V. E. & Panchenko, I. A. (2022). Stress-strain state modelling of the Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy system after electron beam treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 376–383. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.010.

Введение

В последние десятилетия в научном сообществе активно исследуется концепция высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Данный класс материалов характеризуется наличием пяти и более компонентов, каждый из которых варьируется от 5 до 35 ат. %. Благодаря такому соотношению химических элементов ВЭС обладают уникальными микроструктурой и свойствами, отличающими их от традиционных материалов, состоящих из одного-двух основных компонентов [1].

Несмотря на большое число входящих в состав сплавов химических элементов, они, вопреки правилу фаз, обладают высокой степе-

нью растворимости и стремятся к образованию однофазных объемно-центрированной (ОЦК) или гранцентрированной кубических решеток (ГЦК). Это часто связывают с эффектом высокой конфигурационной энтропии смешения элементов [2].

Фазовый состав и свойства ВЭС напрямую зависят от содержания различных элементов. Так, микроструктура системы Al-Co-Cr-Fe-Ni с увеличением содержания Al проходит через несколько стадий: однофазная ГЦК, твердая смесь ГЦК+ОЦК фаз и однофазная ОЦК решетка [3]. Сплав с содержанием Al >20 ат. % благодаря наличию ОЦК фазы имеет повышенную твердость и износостойкость, в то время

как однофазный ГЦК сплав является более пластичным [4].

Процесс изготовления ВЭС также оказывает существенное влияние на конечные свойства изделия. Механические свойства эквимолярного сплава AlCoCrFeNi могут изменяться как при варьировании параметров изготовления, так и в зависимости от используемых технологий для получения и последующей обработки [5-7]. Поэтому для эффективного внедрения и использования ВЭС в промышленности необходимо выбирать метод изготовления, исходя из требуемых свойств.

Для некоторых областей промышленности особенно важным является состояние поверхности детали. В связи с этим различные технологии упрочнения поверхности ВЭС, исследуются в настоящее время. Электронно-пучковая обработка (ЭПО) является одним из эффективных способов поверхностной модификации ВЭС [8-10]. Данный вид энергетического воздействия вызывает различные явления в поверхностном слое, такие как быстрое плавление-затвердевание, испарение-конденсация, сглаживание поверхности и отжиг [11]. Благодаря измельчению зеренной структуры, размеры которой могут уменьшаться до нанометрового диапазона, ЭПО приводит к увеличению твердости, снижению скорости износа и улучшению сопротивляемости коррозии [12, 13].

В нашем предыдущем исследовании показано, что электронно-пучковая обработка ВЭС системы Al-Co-Cr-Fe-Ni приводит к увеличению пластичности и предела прочности, по сравнению с исходным сплавом [14]. Основной причиной обнаруженного явления может быть изменение свойств обработанной поверхности. Чтобы установить причину улучшения механических свойств, в данной работе предлагается использовать метод конечно-элементного моделирования для исследования напряженно-деформированного состояния обработанных электронным пучком образцов при одноосном сжатии. Установление зависимости между значениями напряжений, возникающими в обработанных слоях и режимом ЭПО позволит сформировать более глубокое представление о влиянии данного вида энергетического воздействия на механические свойства высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni.

Материал и методика исследования

ВЭС получен с помощью проволочно-дугового аддитивного производства по методике, представленной в работах [15,16]. ЭПО про-

водилась на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН) при различной плотности энергии пучка электронов 10, 20 и 30 Дж/см²; остальные параметры обработки представлены в работе [15].

Методика построения конечно-элементных моделей образцов из ВЭС системы Al-Co-Cr-Fe-Ni с учетом свойств обработанной поверхности и основного объема материала состояла из двух частей:

В первой части с помощью силовой зондовой микроскопии (Наноскан 3D) проводились измерения модуля упругости в зависимости от расстояния от поверхности обработки. Значение модуля упругости определялось по соотношению углов наклона кривых подвода для исследуемого и эталонных материалов [17].

Образцы для измерения модуля упругости вырезались с помощью электроэрозионной резки в поперечном сечении ВЭС после ЭПО и заливались в эпоксидной смоле для фиксации. Подготовка поверхности для сканирующей зондовой микроскопии заключалась в шлифовке образцов на шлифовальной бумаге с зернистостью от 100 до 2500, последующей полировке с применением пасты ГОИ на войлоке и травлении с помощью раствора H₂O: HNO₃: HCl=6: 1: 3 продолжительностью 12 с.

Во второй части с помощью программы SIMULIA ABAQUS была построена геометрия образцов, имеющих следующие размеры 500 мкм – высота, 250 мкм – длина и ширина. Значения модуля упругости, полученные при измерениях методом силовой зондовой микроскопии, задавались послойно (среднее значение по не менее 3-м измерениям), в зависимости от расстояния от поверхности обработки. Далее указывались размер и форма конечного элемента, после чего модель разбивалась на конечно-элементную сетку.

Граничные условия, прикладываемые к конечно-элементным моделям, обеспечивали идеальное состояние одноосного сжатия. К модельным образцам прикладывались усилия сжатия 2100 МПа, поскольку это максимально допустимое напряжение, полученное экспериментально для ВЭС, обработанного с помощью ЭПО [14].

Результаты и их обсуждение

На рис.1(а-в) представлены результаты сканирующей зондовой микроскопии, на (в-г) –

оптические изображения поперечного сечения образцов высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, полученных с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства и обработанных электронным пучком с различной плотностью энергии. В основном объеме материала наблюдается типичная для электро-

дуговой наплавки дендритная структура. Обработка электронным пучком приводит к оплавлению поверхностного слоя и рекристаллизации зерен. Глубина переплавления увеличивается от 7 до 20 мкм с увеличением плотности энергии пучка электронов (рис.1(г-е)).

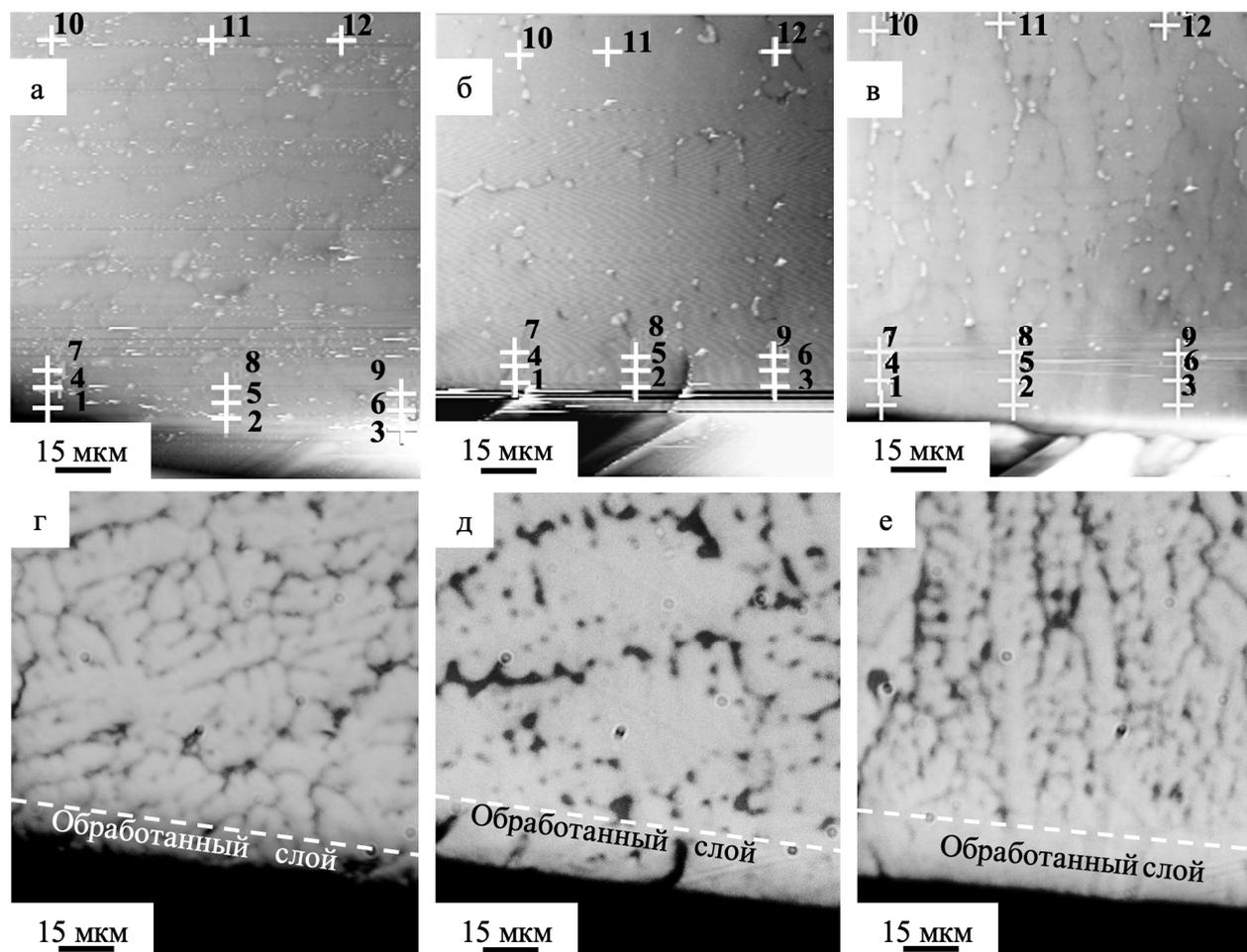


Рис.1. Результаты сканирующей зондовой (а-в) и оптической микроскопии (г-е) высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком с плотностью энергии 10 Дж/см² (а,г), 20 Дж/см² (б,д) и 30 Дж/см² (в,е). Цифрами и знаком «+» отмечены области, в которых проводилось измерение модуля упругости

Fig.1. Results of scanning probe (a-c) and optical microscopy (d-f) of Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy system after electron-beam treatment with the energy density of 10 J/cm² (a,d), 20 J/cm² (b,e) and 30 J/cm² (c,f). Numbers and the sign «+» indicate areas where the elastic modulus was measured

Результаты, приведенные в табл.1 показывают, что, несмотря на то, что все образцы перед ЭПО были вырезаны из одной заготовки, значения модуля упругости на расстояниях более 94 мкм от поверхности обработки отличаются и варьируются в диапазоне от 52 до 89 ГПа. Поэтому в качестве сравнения использовались значения относительного изменения

модуля упругости в обработанном слое по сравнению со значением модуля упругости основного объема материала каждого режима. Основываясь на полученных данных, можно утверждать, что с увеличением плотности энергии пучка электронов значение модуля упругости уменьшается на 21 % при 10 Дж/см², на 30 % при 20 Дж/см² и на 44 % при 30 Дж/см².

Таблица 1. Значения модуля упругости и рассчитанные напряжения в высокоэнтропийном сплаве системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком с различной плотностью энергии

Table 1. Measured elastic modulus and calculated stress values of Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy system after electron-beam treatment with the different energy density

Плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	Расстояние от поверхности обработки, мкм	Экспериментально полученное значение модуля упругости, ГПа	Рассчитанное напряжение, МПа
10	7	58 ± 12	1639
	98	74 ± 10	2074
20	3	62 ± 8	1399
	8	76 ± 16	1715
	11	63 ± 9	1422
	94	89 ± 3	2009
30	5	35 ± 3	1523
	12,5	34 ± 26	1483
	110	52 ± 21	2231

На рис.2(а-в) показано, что при идеальном одноосном сжатии образцов ВЭС напряжения, возникающие в обработанных слоях также, как и значения модуля упругости уменьшаются, в соответствии с законом Гука. При ЭПО с плотностью энергии пучка электронов 20 и 30 Дж/см² наблюдается снижение напряжения на 30 и 32 %, соответственно, тогда как при 10 Дж/см² – на 20 %. Наименьшее рассчитанное напряжение наблюдается в слое, обработанном пучком электронов с плотностью энергии 20 Дж/см² и составляет 1399 МПа.

На рис.2б видно, что рассчитанное напряжение в области материала, находящемся на расстоянии 8 мкм отличается от двух других областей обработанного слоя на ~18 %. Это связано с тем, что модуль упругости на расстоянии 8 мкм от поверхности отличался от модуля упругости, измеренного в соседних областях. Такое распределение напряжений может свидетельствовать о неоднородности микроструктуры на различных расстояниях от поверхности сплава при данном режиме обработки.

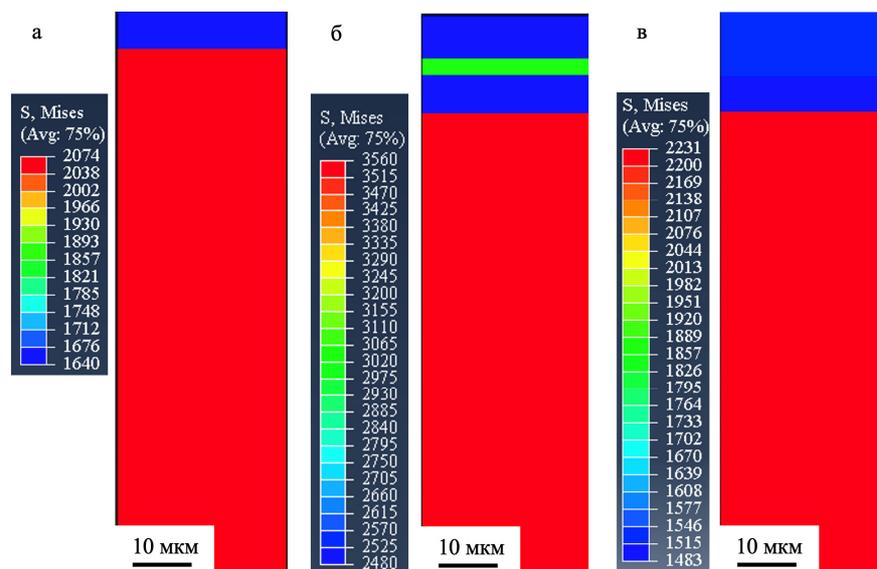


Рис.2. Результаты конечно-элементного моделирования одноосного сжатия высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком с различной плотностью энергии: (а) 10 Дж/см², (б) 20 Дж/см² и (в) 30 Дж/см²

Fig.2. The results of finite-element modelling of uniaxial compression of Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy system with the electron beam energy density of (a) 10 J/cm², (b) 20 J/cm² и (c) 30 J/cm²

Анализ напряженно-деформированного состояния конечно-элементных моделей при идеальном одноосном сжатии показал неоднородное распределение напряжений в образцах высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанных электронным пучком. Уменьшение модуля упругости и, соответственно, значений напряжений в обработанных слоях может быть обусловлено тем, что в процессе электронно-пучковой обработки, происходит оплавление поверхностного слоя, сопровождающегося более равномерным перераспределением атомов элементов, при этом фазовый состав не изменяется. Это подтверждается результатами рентгенофазового и микроэлементного анализа, представленными в предыдущем исследовании [15].

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что увеличение предела прочности высокоэнтропийного сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, установленное в работе [14] может быть обусловлено снижением модуля упругости в поверхностном слое. При этом основной объем материала сохраняет исходные свойства. Таким образом, образец может рассматриваться как композиционный слоистый материал. Поскольку поверхностный слой имеет меньшее значение модуля упругости, механизм его деформации изменяется с хрупкого на вязкий. Это, в свою очередь, способно увеличить общую пластичность образца сплава, что и продемонстрировали результаты механических испытаний на одноосное сжатие.

Выводы

В настоящей работе построены конечно-элементные модели, частично учитывающие изменения структуры материала, и определено напряженно-деформированное состояние сплава системы Al-Co-Cr-Fe-Ni, обработанного электронным пучком с различной плотностью энергии. Следующие выводы могут быть сделаны:

1. Установлено, что с увеличением плотности энергии пучка электронов при ЭПО модуль упругости обработанной поверхности снижается на 21 % при 10 Дж/см², на 30 % при 20 Дж/см² и на 44 % при 30 Дж/см², по сравнению с основным объемом материала.

2. Электронно-пучковая обработка уменьшает значения внутренних напряжений в обработанном слое, возникающих при одноосном сжатии, по сравнению с основным материалом. Наименьшее значение напряжения обнаружено

в сплаве, обработанном с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см² и составляет 1399 МПа.

3. Увеличение прочности и пластичности ВЭС системы Al-Co-Cr-Fe-Ni после ЭПО может быть обусловлено уменьшением модуля упругости поверхностного слоя, приводящему к изменению механизма деформации с хрупкого на вязкий.

Список литературы

1. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. V. 122. P. 448–511.
2. Ng C., Guo S., Luan J., et al. Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy // *Intermetallics*. 2012. V. 31. P. 165–172.
3. Yang T., Xia S., Liu S., et al. Effects of Al addition on microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi High-entropy alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2015. V. 648. P. 15–22.
4. Wang W.-R., Wang W.-L., Wang S.-C., et al. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys // *Intermetallics*. 2012. V. 26. P. 44–51.
5. Kafexhiu F., Podgornik B., Feizpour D. Tribological behavior of As-Cast and aged Al-CoCrFeNi_{2.1} CCA // *Metals (Basel)*. 2020. V. 10, N 2. P. 208.
6. Niu P.D., Li R.D., Yuan T.C., et al. Microstructures and properties of an equimolar Al-CoCrFeNi high entropy alloy printed by selective laser melting // *Intermetallics*. 2019. V. 104. P. 24–32.
7. Mohanty S., Maity T.N.N., Mukhopadhyay S., et al. Powder metallurgical processing of equiatomic AlCoCrFeNi high entropy alloy: Microstructure and mechanical properties // *Materials Science and Engineering A*. Elsevier, 2017. V. 679. P. 299–313.
8. Lyu P., Chen Y., Liu Z., et al. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam // *Applied Surface Science*. 2020. V. 504. P. 144453.
9. Cai J., Zu Z., Li C., et al. Hot Corrosion Behavior of Arc Ion Plating NiCoCrAlYSiHf Coating Via High-Current Pulsed Electron Beam // *Oxidation of Metals*. 2020. V. 94, N 5–6. P. 569–586.

10. Cai J., Yao Y., Gao C., et al. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCo-CrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. V. 881. P. 160651.

11. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends // *Metals*. 2020. V. 10, N 9. P. 1–20.

12. Lyu P., Peng T., Miao Y., et al. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2021. V. 410. P. 126911.

13. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron-beams // *Russian Physics Journal*. 2008. V. 51, N 5. P. 505–516.

14. Gromov V., Ivanov, Y., Konovalov, S., et al. Modification of high-entropy alloy AlCoCrFeNi by electron beam treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 13. P. 787–797.

15. Osintsev K., Gromov V., Ivanov Y., et al. Evolution of structure in alcocrfeni high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam // *Metals*. 2021. V. 11, N 8. 1228.

16. Osintsev K., Konovalov S., Gromov V., et al. Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatomic Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing // *Philosophical Magazine Letters*. 2021. V. 101, N 9. P. 353–359.

17. Cappella B., Dietler G. Force-distance curves by atomic force microscopy // *Surface Science Reports*. 1999. V. 34, N 1–3. P. 104.

Информация об авторах

К. А. Осинцев – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

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

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

С. В. Воронин – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

И. И. Левин – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

В. С. Данилушкин – аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

References

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

2. Ng, C., Guo, S., Luan, J., Shi, S. & Liu, C. (2012). Entropy-driven phase stability and slow diffusion kinetics in an Al_{0.5}CoCrCuFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 31, 165–172.

3. Yang, T., Xia, S., Liu, S., Wang, C., Liu, S., Zhang, Y., Xue, J., Yan, S. & Wang, Y. (2015). Effects of AL addition on microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi High-entropy alloy. *Materials Science and Engineering A*, 648, 15–22.

4. Wang, W.-R., Wang, W.-L., Wang, S.-C., Tsai, Y.-C., Lai, C.-H. & Yeh, J.-W. (2012). Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al_xCoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*, 26, 44–51.

5. Kafexhiu, F., Podgornik, B. & Feizpour, D. (2020). Tribological Behavior of As-Cast and Aged AlCoCrFeNi_{2.1} CCA. *Metals*, 10(2), 208.

6. Niu, P. D., Li, R. D., Yuan, T. C., Zhu, S. Y., Chen, C., Wang, M. B. & Huang, L. (2019). Microstructures and properties of an equimolar AlCoCrFeNi high entropy alloy printed by selective laser melting. *Intermetallics*, 104, 24–32.

7. Mohanty, S., Maity, T. N. N., Mukhopadhyay, S., Sarkar, S., Gurao, N. P. P., Bhownik, S. & Biswas, K. (2017). Powder metallurgical processing of equiatomic AlCoCrFeNi high entropy alloy: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 679, 299–313.
8. Lyu, P., Chen, Y., Liu, Z., Cai, J., Zhang, C., Jin, Y., Guan, Q. & Zhao, N. (2020). Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*, 504, 144453.
9. Cai, J., Zu, Z., Li, C., Lyu, P., Guan, Q. & Li, Y. (2020). Hot Corrosion Behavior of Arc Ion Plating NiCoCrAlYSiHf Coating Via High-Current Pulsed Electron Beam. *Oxidation of Metals*, 94(5–6), 569–586.
10. Cai, J., Yao, Y., Gao, C., Lyu, P., Meng, X., Guan, Q., Li, Y. & Han, Z. (2021). 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*, 881, 160651.
11. Valkov, S., Ormanova, M. & Petrov, P. (2020). Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends. *Metals*, 10(9), 1–20.
12. Lyu, P., Peng, T., Miao, Y., Liu, Z., Gao, Q., Zhang, C., Jin, Y., Guan, Q. & Cai, J. (2021). Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*, 410, 126911.
13. Koval', N. N. & Ivanov, Yu. F. (2008). Nanostructuring of surfaces of metaloceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal*, 51(5), 505–516.
14. Gromov, V., Ivanov, Y., Konovalov, S., Osintsev, K., Semin, A. & Rubannikova, Y. (2021). Modification of high-entropy alloy AlCoCrFeNi by electron beam treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 787–797.
15. Osintsev, K., Gromov, V., Ivanov, Y., Konovalov, S., Panchenko, I. & Vorobyev, S. (2021). Evolution of structure in alcocrfeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Metals*, 11(8), 1228.
16. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Panchenko, I. & Ivanov, Y. (2021). Microstructural and mechanical characterisation of non-equiatomic Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy fabricated via wire-arc additive manufacturing. *Philosophical Magazine Letters*, 101(9), 353–359.
17. Cappella, B. & Dietler, G. (1999). Force-distance curves by atomic force microscopy. *Surface Science Reports*, 34(1–3), 104.

Information about the authors

K. A. Osintsev – Postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University.

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

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

S. V. Voronin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University.

I. I. Levin – Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University.

V. S. Danilushkin – Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University.

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy of Image Processing, Siberian State Industrial University.

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

Статья поступила в редакцию 08.07.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022; принята к публикации 22.07.2022.

The article was received by the editorial board on 08 July 22; approved after reviewing on 15 July 22; accepted for publication on 22 July 22.