

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 536.425:539.25:539.351

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.007

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СИСТЕМУ
«ПЛЕНКА (В+Cr) – ПОДЛОЖКА (ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ СПЛАВ AlCrFeCoNi)»****Юрий Федорович Иванов^{1†}, Владимир Викторович Шугуров², Антон Дмитриевич Тересов³,
Михаил Олегович Ефимов⁴, Виктор Евгеньевич Громов⁵, Сергей Валерьевич Коновалов⁶,
Ирина Алексеевна Панченко⁷, Юлия Андреевна Шлярова⁸**^{1, 2, 3} Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия^{4, 5, 6, 7, 8} Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² shugurov@opec.hcei.tsc.ru³ tad514@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5363-0108>⁴ moefimov@mail.ru⁵ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>⁶ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁷ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>⁸ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

Аннотация. Пленочные покрытия на высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) являются одним из перспективных и наиболее изучаемых объектов последнего десятилетия. С помощью проволочного дугового аддитивного производства подготовлен ВЭС AlCrFeCoNi: неэквивалентного состава, на который методом плазменно ассистированного ВЧ-распыления была нанесена пленка В+Cr толщиной ~ 1 мкм. Последующая обработка состояла в электронно-пучковом облучении поверхности с параметрами: плотность энергии 20-40 Дж/см², длительность импульса 200 мкс, частота 0,3 с⁻¹, число импульсов 3. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка-подложка», трибологических и механических свойств проводили методами современного физического материаловедения. Установлено квазипериодическое распределение химических элементов (ат. %) 33,4 Al; 8,3 Cr; 17,1 Fe; 5,4 Co; 35,7 Ni. Показано, что при плотности энергии пучка электронов $E_s=20$ Дж/см² микротвердость повышается в 2 раза, износостойкость в 5 раз, коэффициент трения снижается в 1,3 раза. При $E_s=20$ Дж/см² поверхность фрагментируется сеткой микротрещин с размерами фрагментов 40-200 мкм. Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к образованию субзеренной структуры с размерами субзерен (150-200 нм). Возрастание прочностных и трибологических свойств при электронно-пучковой обработке интерпретировано с учетом снижения размера зерен, формирования оксидов хрома и алюминия, образования твердого раствора внедрения бора в кристаллическую решетку ВЭС.

Ключевые слова: пленка В+Cr, высокоэнтропийный сплав AlCrFeCoNi, электроннопучковая обработка, фазы, элементный состав.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – модифицирование ВЭС, исследование структуры и свойств модифицированного слоя ВЭС; при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 20-19-00452) – изготовление образцов ВЭС с помощью технологии проволочно-дугового аддитивного производства.

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Тересов А.Д., Ефимов М.О., Громов В.Е., Коновалов С.В., Панченко И.А., Шлярова Ю.А. Влияние электронно-пучковой обработки на систему «пленка (В+Cr) – подложка (высокоэнтропийный сплав AlCrFeCoNi)» // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 343–352. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.007.

Original article

**EFFECT OF ELECTRON-BEAM TREATMENT
OF «FOIL (B+Cr) – SUBSTRATE (AlCrFeCoNi HIGH ENTROPY ALLOY)»****Yuriy F. Ivanov^{1†}, Vladimir V. Shugurov², Anton D. Teresov³, Michail O. Efimov⁴,
Viktor E. Gromov⁵, Sergey V. Kononov⁶, Irina A. Panchenko⁷, Yuliya A. Shlyarova⁸**^{1, 2, 3} Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskyy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia^{4, 5, 6, 7, 8} Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia¹ yufi55@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>² shugurov@opec.hcei.tsc.ru³ tad514@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5363-0108>⁴ moefimov@mail.ru⁵ gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>⁶ kononov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>⁷ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>⁸ rubannikova96@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

Abstract. Film coatings for high entropy alloys (HEA) are one of the last decade's promising and most studied objects. The AlCrFeCoNi WEC is prepared with a wire-arc additive production: a non-equivalent composition on which a B+Cr film of ~ 1 μm thickness was applied by plasma-assisted HF spraying. The subsequent treatment consisted of electron beam irradiation of the surface with parameters: energy density 20-40 J/cm², pulse duration 200 μs, frequency 0.3 s⁻¹, pulse number 3. The study of elemental and phase composition, condition of the defective substructure of system «film-substrate», tribological and mechanical properties were carried out by modern methods of physical materials science. There is a quasi-periodic distribution of chemical elements (at. %) 33.4 Al; 8.3 Cr; 17.1 Fe; 5.4 Co; 35.7 Ni. It is shown that at the energy density of electron beam E_s=20 J/cm² the microhardness increases by 2 times, the wear resistance is 5 times, and the coefficient of friction is reduced by 1.3 times. A mesh of microfractures fragments the surface with fragment sizes of 40-200 μm energy density At E_s=20 J/cm². High-speed crystallization of the surface layer leads to forming a subgrain structure with subgrain sizes (150-200 nm). The increase of strength and tribological properties in electron beam processing is interpreted by taking into account the reduction of grain size, the formation of chromium and aluminium oxides, the formation of a solid solution of boron introduction into the crystal grid of the wind farm.

Keywords: B+Cr film, AlCrFeCoNi high entropy alloy, electron beam treatment, phases, element composition.

Acknowledgements: The work was done by a grant from the Russian Scientific Fund No. 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/> – modification of the HEA, study of the structure and properties of the modified HEA layer; with the financial support of the PHF grant (project No. 20-19-00452) – manufacturing of HEA samples using wire-arc additive production technology.

For citation: Ivanov, Yu. F., Shugurov, V. V., Teresov, A. D., Efimov, M. O., Gromov, V. E., Kononov, S. V., Panchenko, I. A. & Shlyarova, Yu. A. (2022). Effect of electron-beam treatment of «foil (B+Cr) – substrate (AlCrFeCoNi high entropy alloy)». *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 343–352. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.007.

Введение

Идея создания и исследования высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) с равными или близкими концентрациями компонентов занимает ведущее место в современном физическом материаловедении последнего десятилетия [1-3]. Это объясняется высоким уровнем функциональных свойств ВЭС. Разрабатываются конструкционные крио и жаропрочные, коррозионно-стойкие, с особыми магнитными и электрическими свойствами ВЭС, а также соединения на основе (карбиды, нитриды, оксиды, бориды,

силициды) [4-8]. Быстрыми темпами создаются и совершенствуются методы получения ВЭС: кристаллизация из расплавов после аргоно-дугового, индукционного, селективного лазерного плавления [9-13]. Вторым по популярности методом получения ВЭС можно считать механическое сплавление [14-18], а третьим для получения объемных ВЭС стал самораспространяющийся высокотемпературный синтез [19-21]. В отдельную группу можно выделить методы получения ВЭС в виде тонких покрытий и пленок. Обычно они основаны на использовании магнетронного напыления для

получения многокомпонентных нитридов [22, 23], карбидов [24], оксидов [25]. В последние годы этим методом получены многослойные наноструктуры, в которых ВЭС слои чередуются со слоями чистого металла [26, 27]. Высокоэнтропийные покрытия и пленки вместо объемных ВЭС снижают стоимость изделий и расширяют области их применения. Покрытия из FeCoNiCrX (X = Mn, Al) ВЭС на медной подложке, полученные методом электроосаждения, в разы увеличивают микротвердость, коррозионную стойкость, снижают коэффициент трения и износ [28].

В целях улучшения свойств поверхности ВЭС их подвергают различным видам поверхностной обработки: электролитическому полированию, электроэрозионной обработке, фрезерованию, шлифованию, механической полировке, а также комбинированию этих методов [29]. В работе [30] проблема низкой прочности и износостойкости сплава CoCrFeMnNi была решена методом порошкового борирования (powder pack boriding). Одним из перспективных высокоэффективных методов поверхностного упрочнения является электронно-пучковая обработка [31]. Она обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10^8 К/с) поверхности и охлаждения за счет теплоотвода в основной объем материала, в результате чего образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния [32].

Целью настоящей работы является установление природы влияния электронно-пучковой обработки на элементный, фазовый состав, дефектную субструктуру и свойства системы «пленка В+Cr – подложка (высокоэнтропийный сплав AlCrFeCoNi)».

Материалы и методы исследования

Высокоэнтропийный сплав (ВЭС) неэквивалентного состава AlCrFeCoNi, полученный по аддитивной технологии WAAM – проволочно-дугового аддитивного производства был использован в качестве материала исследования. Первоначально на поверхности ВЭС была сформирована пленка В+Cr толщиной 0,5 мкм каждого элемента. Формирование пленки бора на поверхности образцов ВЭС осуществляли методом плазменно-ассистированного ВЧ-распыления катода из порошка бора при следующих параметрах процесса: ВЧ мощность $W = 800$ Вт, частота $f = 13,56$ МГц, длитель-

ность процессов $t = 35$ мин., что соответствовало толщине пленки бора 0,5 мкм; ток плазмогенератора «ПИНК» $I_{пг} = 50$ А, ток накала $I_{н} = 145$ А, напряжение смещения $U_{см} = 50$ В, коэффициент заполнения 75%, частота смещения 50 кГц. Перед формированием пленки бора (после помещения в камеру установки и последующего вакуумирования) поверхность образцов ВЭС подвергалась дополнительному кратковременному (15 мин.) травлению плазмой аргона. На образцы с пленкой бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах процесса: образцы с пленкой бора напротив дугового испарителя, без вращения, ток дугового испарителя $I_{д} = 80$ А, $I_{пг} = 20$ А, $I_{н} = 135$ А, 75 %, $U_{см} = 35$ В, $p = 0,3$ Па, время напыления хрома – 10 мин. Далее сформированную на подложке пленку облучали электронным пучком с параметрами: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (20-40) Дж/см², длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов $0,3$ с⁻¹, давление рабочего газа (аргон) 0,02 Па. При таком облучении температура поверхности ВЭС превышает температуру плавления. При высокоскоростном нагреве и последующем охлаждении со скоростью $\sim 10^7$ К/с возможно формирование субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры, содержащей бориды в качестве упрочняющей фазы. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка (Cr+В) / (ВЭС) подложка» проводили методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM 515 Philips с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV). Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония); съемку осуществляли в медном отфильтрованном излучении Cu-K α_1 ; монохроматор CM-3121. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПИМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pin on Disc

and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из керамического материала Al_2O_3 диаметром 6 мм, радиус дорожки трения 2 мм, путь, пройденный контртелом, 100 м, скорость вращения образца 25 мм/с, нагрузка на индентор 2 Н. Трибологические испытания осуществляли в условиях сухого трения при комнатной температуре.

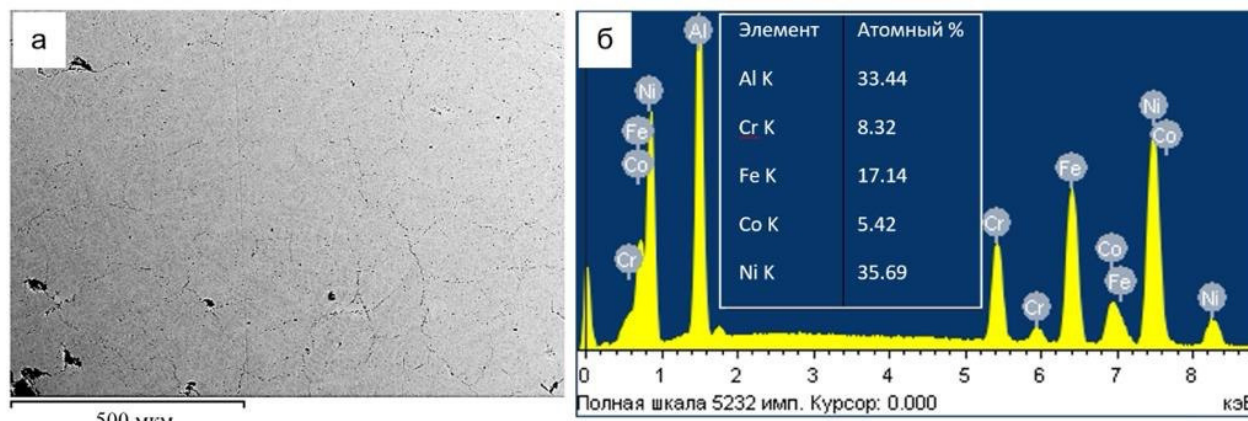


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС (а); б – энергетические спектры участка ВЭС, приведенного на (а)

Fig.2. Electron microscopic images of HEA's structure (a); b – energy spectra of HEA area shown in (a)

Импульсная электронно-пучковая обработка системы «пленка-подложка» значительно изменяет механические и трибологические свойства ВЭС. Во-первых, значительно возрастает микротвердость, достигая максимума при плотности энергии пучка электронов $E_s = 20$ Дж/см² (Табл.1). При этом же значении E_s снижается износ и коэффициент трения. Это может быть обусловлено преобразованием структуры поверхностного слоя. Анализ, выполненный методами СЭМ, показывает, что поверхность системы «пленка-подложка» при $E_s = 20$ Дж/см² фрагментирована сеткой микротрещин, размеры фрагментов 40-200 мкм. Средний размер зерен во фрагментах составляет 2,7 мкм, что в 4,5 раза меньше размера зерен ВЭС до облучения. Такое значительное уменьшение среднего размера является причиной повышения прочностных свойств системы «пленка-подложка». При $E_s = 40$ Дж/см² наблюдается рост среднего размера зерен до 10 мкм, сетка микротрещин сохраняется, что свидетельствует о высоком уровне растягивающих напряжений в поверхностных слоях при облучении.

При облучении системы «пленка-подложка» с $E_s=20$ Дж/см² наблюдается раство-

Результаты и их обсуждение

Структура ВЭС, сформированного методом WAAM, имеет дендритное строение (рис.1а). Средний размер зерна поликристаллов составляет 12,3 мкм (рис.1б).

рение пленки. Выявлены протяженные прослойки пленки в объеме и вдоль границ фрагментов и островки пленки в стыках фрагментов. При $E_s = 30$ Дж/см² и выше пленка (В+Cr) полностью растворяется. Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что сохранившиеся после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком при 20 Дж/см² участки пленки обогащены атомами хрома, бора и кислорода. Вдоль границ фрагментов наблюдаются протяженные прослойки, обогащенные кислородом и алюминием. При высокоскоростной кристаллизации поверхностного слоя формируется субзернистая структура. При $E_s = 20$ Дж/см² субзернистая структура наблюдается редко; при $E_s = 30$ Дж/см² субзернистая структура формируется в стыках границ зерен и фрагментов; при $E_s = 40$ Дж/см² субзерна формируются по всей поверхности образца. Размер субзерен не зависит от плотности энергии пучка электронов и составляет (150-200) нм. Участки, образовавшиеся на поверхности при облучении системы «пленка-подложка» при $E_s = (30-40$ Дж/см²) обогащены атомами хрома, алюминия и кислорода (рис.3).

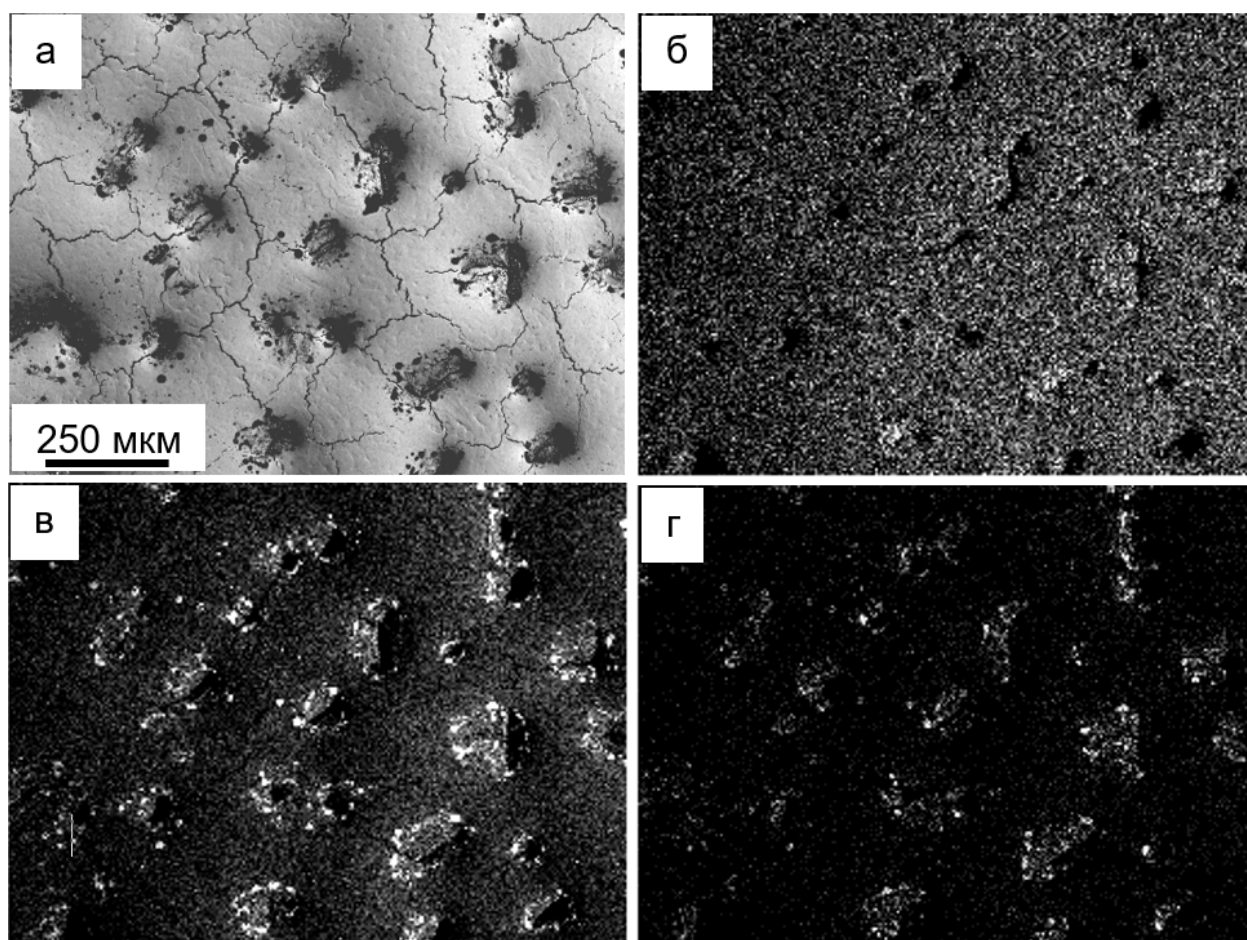


Рис.3. Электронно-микроскопическое изображение структуры системы «пленка-подложка», облученной импульсным электронным пучком при плотности энергии $E_s=20$ Дж/см², б-г – изображения участка образца(а) полученные в характеристическом излучении атомов Cr (б); O (в); Al (г)

Fig.3. Electron-microscopic image of structure of system «film-substrate», irradiated by pulse electronic beam at energy density $E_s=20$ J/cm², b-d – images of a section of the sample (a) obtained in the characteristic radiation of Cr atoms (b); O(c); Al (d)

Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют, что в результате облучения системы «пленка-подложка» образуются оксиды хрома и алюминия, количество которых снижается с увеличением плотности энергии пучка электронов. Формирование оксидов также будут способствовать повышению микротвердости и износостойкости ВЭС.

Методом рентгенофазового анализа поверхности системы «пленка-подложка» было показано, что независимо от величины E_s сплав представляет собой однофазный материал с простой кубической решеткой (рис.4).

Из таблицы следует, что параметр кристаллической решетки немонотонно возрастает при увеличении E_s .

Одной из причин такого поведения является легирование образцов атомами бора, концентрация которых в объеме сплава, судя по результатам, полученным методами сканирующей электронной микроскопии, будет увеличиваться с ростом плотности энергии в интервале $E_s = (20-30)$ Дж/см². Атомы бора в кристаллической решетке ВЭС будут на позициях внедрения, что и приведет к росту параметра решетки. Формирование твердого раствора внедрения является еще одним физическим механизмом, способствующим повышению твердости сплава. Наличие упрочняющих фаз в исследуемом сплаве методами рентгенофазового анализа не обнаружено.

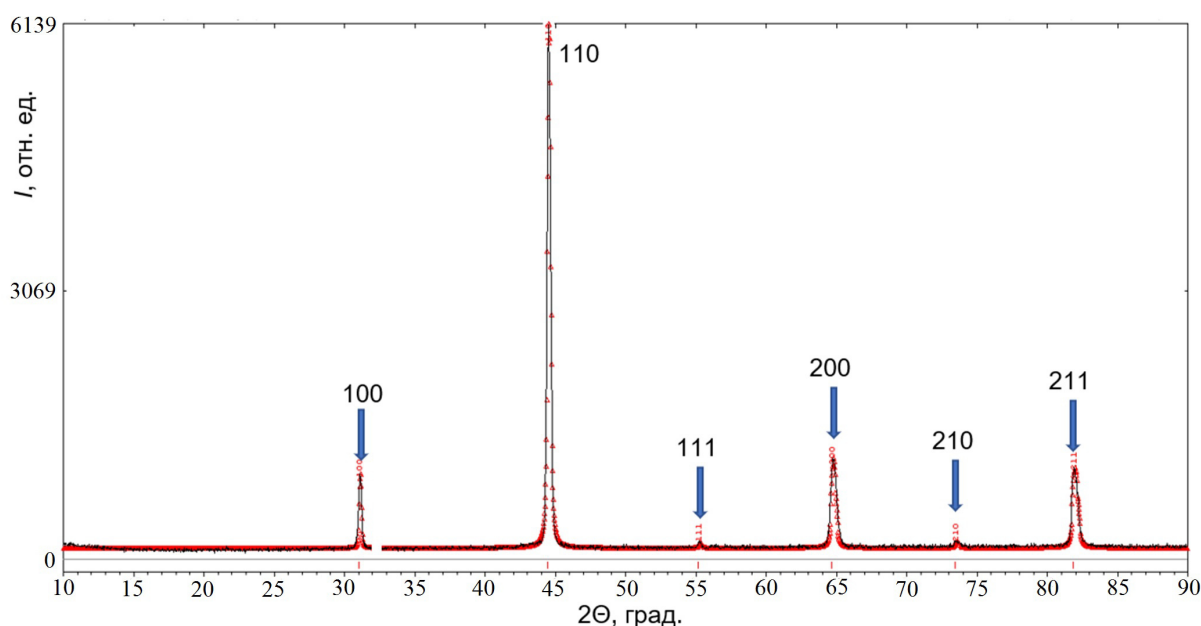


Рис.4. Фрагмент рентгенограммы поверхностного слоя ВЭС, модифицированного путем облучения системы «пленка-подложка» импульсным электронным пучком при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$

Fig.4. X-ray fragment of surface layer of wind farm, modified by irradiation of system «film-substrate» by pulse electronic beam at energy density $E_s=20 \text{ J/cm}^2$

Таблица 1. Зависимость микротвердости HV (а), параметра износа k (б), коэффициента трения μ (в) и параметра кристаллической решетки a (г) поверхности системы «пленка-подложка» от величины плотности энергии пучка электронов E_s

Table 1. Dependence of microhardness HV (a), wear parameter k (b), coefficient of friction (c) and parameter of crystal lattice a (d) of «film-substrate» from the energy density of electron beam

$E_s, \text{ Дж/см}^2$	0	20	30	40
Параметр				
HV, ГПа	6,0	9,0	6,8	5,5
$k, 10^{-5}, \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	4,5	2,5	5,1	7,5
μ	0,80	0,50	0,57	0,61
$a, \text{ нм}$	0,28795	0,28798	0,28820	0,28815

Примечание: в исходном состоянии ВЭС $HV = 4,7 \text{ ГПа}$, $k = 14 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, $\mu = 0,65$.

Note: the HEA standart parameters are $HV = 4,7 \text{ ГПа}$, $k = 14 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, $\mu = 0.65$.

Закключение

Используя технологию проволочно-дугового аддитивного производства, получен высокоэнтропийный сплав AlCrFeCoNi неэквивалентного состава. Методами современного физического материаловедения проанализирован элементный и фазовый состав, дефектная субструктура, механические и трибологические свойства поверхности пленки В+Cr, напылен-

ной на ВЭС и облученной импульсным электронным пучком.

Определен режим облучения (плотность энергии 20 Дж/см^2 , длительность 200 мкс, число импульсов – 3, частота $0,3 \text{ с}^{-1}$), повышающий почти в 2 раза микротвердость более чем в 5 раз износостойкость и снижающих коэффициент трения в 1,3 раза. Обсуждены возможные причины увеличения прочностных и трибологических свойств системы «пленка-подложка», заключающиеся в снижении среднего размера

зерна и формировании частиц оксидов Cr и Al и внедрении атомов бора в решетку ВЭС.

Список литературы

1. Wang Z., Huang Y., Yang Y., Wang J., Liu C.T. Atomic-size effect and solid solubility of multicomponent alloys // *Scripta Mater.* 2015. V. 94 P. 28–31.
2. Luo Y.-R., Benson S.W. The covalent potential: a simple and useful measure of the valence-state electronegativity for correlating molecular energies // *Acc. Chem. Res.* 1992. V. 25. P. 375–381.
3. Li D.Y., Zhang Y. The ultrahigh charpy impact toughness of forged AlCoCrFeNi high entropy alloys at room and cryogenic temperatures // *Intermetallics.* 2016. V. 70. P. 24–28.
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 Mater. Sci.* 2014. V. 61. P. 1–93.
5. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Mater.* 2017. V. 122. P. 448–511.
6. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Sci. China Mater.* 2018. V. 61, N 1. P. 2–22.
7. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review // *Mater. Res. Lett.* 2014. V. 2:3, N 3. P. 107–123.
8. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // *J. Mater. Res. Technol.* 2016. V. 5, N 4. P. 384–393.
9. 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 design concepts and outcomes // *Adv. Eng. Mater.* 2004. V. 6, N 5. P. 299–303.
10. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Mater. Sci. Eng. A.* 2004. V. 375–377. P. 213–218.
11. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y., Lin S.-J., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements // *Metal. Mater. Trans. A.* 2004. V. 35A. P. 2533–2536.
12. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploration // *Mater. Sci. Forum.* 2007. V. 560. P. 1–9.
13. Крапивка Н.А., Фирстов С.А., Карпец М.В., Мысливченко А.Н., Горбань В.Ф. Особенности фазообразования и формирования структуры в высокоэнтропийных сплавах системы AlCrFeCoNiCu_x (x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0) // *ФММ.* 2015. Т. 116, № 5. С. 496–504.
14. Ji W., Wang W., Wang H., Zhang J., Wang Y., Zhang F., Fu Z. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Intermetallics.* 2015. V. 56. P. 24–27.
15. Moravcik I., Cizek J., Zapletal J., Kovacova Z., Vesely J., Minarik P., Kitzmantel M., Neubauer E., Dlouhy I. Microstructure and mechanical properties of Ni_{1.5}Co_{1.5}CrFeTi_{0.5} high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Mater. and Design.* 2017. V. 119. P. 141–150.
16. Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Шукин А.С., Вадченко С.Г., Ковалев И.Д. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала // *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2018. № 2. С. 35–42.
17. Prusa F., Senkova A., Kucera V., Capek J., Vojtech D. Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering // *Mater. Sci. Eng. A.* 2018. V. 734. P. 341–352.
18. Alcalá M.D., Real C., Fombella I., Trigo I., Córdoba J.M. Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized FeCoNiCrMn high entropy alloy // *J. Alloys Compd.* 2018. V. 749. P. 834–843.
19. Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. М.: Физматлит, 2012. 398 с.
20. Санин В.Н., Юхвид В.И., Икорников Д.М., Андреев Д.Е., Сачкова Н.В., Алымов М.И. СВС-металлургия литых высокоэнтропийных сплавов на основе переходных металлов // *ДАН.* 2016. Т. 470, № 4. С. 421–426.
21. Sanin V.N., Ikonnikov D.M., Andreev D.E., Sachkova N.V., Yuxhvid V.I. Synthesis of cast

high entropy alloys with a low specific gravity by centrifugal metallothermic SHS-methods // *Advanced Mater. Techn.* 2017. N 3. P. 24–33.

22. Chang S.Y., Lin S.Y., Huang Y.C., Wu C.L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_x$ multi-component coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2010. V. 204. P. 3307–3314.

23. Shen W.-J., Tsai M.-H., Chang Y.-S., Yeh J.-W. Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of $(\text{Al}_{1.5}\text{CrNb}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{Ti})\text{N}_x$ coatings // *Thin Solid Films.* 2012. V. 520. P. 6183–6188.

24. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C.R., Braic M. Nanostructured multi-element $(\text{TiZrNbHfTa})\text{N}$ and $(\text{TiZrNbHfTa})\text{C}$ hard coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2012. V. 211. P. 117–121.

25. Lin M.I., Tsai M.H., Shen W.J., Yeh J.W. Evolution of structure and properties of multi-component $(\text{AlCrTaTiZr})\text{O}_x$ films // *Thin Solid Films.* 2010. V. 518. P. 2732–2737.

26. Zhao Y., Zhang J., Wang Y., Wu K., Liu G., Sun J. Size-dependent mechanical properties and deformation mechanisms in Cu/NbMoTaW nanolaminates // *Sci. China Mater.* 2020. V. 63. P. 444–452.

27. Cao Z.H., Ma Y.J., Cai Y.P., Wang G.J., Meng X.K. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable nanolayer thickness // *Scripta Mater.* 2019. V. 173. P. 149–153.

28. Zhi yi Rong, Chaohui Wang, Ya Wang, Meiting Dong et al. Microstructure and properties of FeCoNiCrX ($\text{X}=\text{Mn,Al}$) high entropy alloy coatings // *Journal of Alloys and Compounds.* 2022. V. 921. 166061.

29. Guo J., Goh M., Zhu Z., Lee X., Nai M.L.S., Wei J. On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials and Design.* 2018 V. 153. P. 211–220.

30. Lindner T., Löbel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding // *Surface and Coatings Technology.* 2019. V. 371. P. 389–394.

31. 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. V. 21, N 3. P. 345–362.

32. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A.

Improvement of functional properties of alloys by electron beam treatment // *Steel in Translation.* 2022. V. 52, N 1. P. 71–75.

Информация об авторах

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН.

В. В. Шугуров – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН.

А. Д. Тересов – ведущий электроник лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН.

М. О. Ефимов – инженер управления научных исследований Сибирского государственного индустриального университета.

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

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

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. А. Шлярова – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

References

1. Wang, Z., Huang, Y., Yang, Y., Wang, J. & Liu, C. T. (2015). Atomic size effect and solid solubility of multicomponent alloys. *Scripta Mater.*, 94, 28–31.

2. Luo, Y.-R. & Benson, S. W. (1992). The covalent potential: a simple and useful measure of the valence-state electronegativity for correlating molecular energies. *Acc. Chem. Res.*, 25, 375–381.

3. Li, D. Y. & Zhang, Y. (2016). The ultrahigh charpy impact toughness of forged AlCoCrFeNi high entropy alloys at room and cryogenic temperatures. *Intermetallics*, 70, 24–28.
4. Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K. & Lu, Z. P. (2014). Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Mater. Sci.*, 61, 1–93.
5. Miracle, D. B. & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.*, 122, 448–511.
6. Zhang, W., Liaw, P. K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Sci. China Mater.*, 1(61), 2–22.
7. Tsai, M.-H. & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Mater. Res. Lett.*, 3(2:3), 107–123.
8. Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O. & Oke, S. R. (2016). Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *J. Mater. Res. Technol.*, 4(5), 384–393.
9. Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Gan, J.-Y., Chin, T.-S., Shun, T.-T., Tsau, C.-H. & Chang, S.-Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel design concepts and outcomes. *Adv. Eng. Mater.*, 5(6), 299–303.
10. Cantor, B., Chang, I. T. H., Knight, P., Vincent, A. J. B. (2004). Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Mater. Sci. Eng. A.*, 375–377, 213–218.
11. Yeh, J.-W., Chen, S.-K., Gan, J.-Y., Lin, S.-J., Chin, T.-S., Shun, T.-T., Tsau, C.-H. & Chang, S.-Y. (2004). Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metal. Mater. Trans. A.*, 35A, 2533–2536.
12. Yeh, J.-W., Chen, Y.-L., Lin, S.-J., Chen, S.-K. (2007). High-entropy alloys – a new era of exploration. *Mater. Sci. Forum*, 560, 1–9.
13. Krapivka, N. A., Firstov, S. A., Karpets, M. V., Myslivchenko, A. N. & Gorban, V. F. (2015). Peculiarities of phase formation and structure formation in high-entropy alloys of the AlCrFeCoNiCu_x system (x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0). *FMM*, 5(116), 496–504. (In Russ.).
14. Ji, W., Wang, W., Wang, H., Zhang, J., Wang, Y., Zhang, F. & Fu, Z. (2015). Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Intermetallics*, 56, 24–27.
15. Moravcik, I., Cizek, J., Zapletal, J., Kovacova, Z., Vesely, J., Minarik, P., Kitzmantel, M., Neubauer, E. & Dlouhy, I. (2017). Microstructure and mechanical properties of Ni_{1.5}Co_{1.5}CrFeTi_{0.5} high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Mater. and Design*, 119, 141–150.
16. Kochetov, N. A., Rogachev, A. S., Shchukin, A. S., Vadchenko, S. G. & Kovalev, I. D. (2018). Mechanical alloying with partial amorphization of a multicomponent Fe-Cr-Co-Ni-Mn powder mixture and its electrospark plasma sintering to obtain a compact high-entropy material. *Izv. universitets. Powder metallurgy and functional coatings*, 2, 35–42. (In Russ.).
17. Prusa, F., Senkova, A., Kucera, V., Capek, J. & Vojtech, D. (2018). Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering. *Mater. Sci. Eng. A.*, 734, 341–352.
18. Alcala, M. D., Real, C., Fombella, I., Trigo, I. & Cordoba, J. M. (2018). Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized FeCoNiCrMn high entropy alloy. *J. Alloys Compd.*, 749, 834–843.
19. Rogachev, A. S. & Mukasyan, A. S. (2012). Combustion for the synthesis of materials: an introduction to structural macrokinetics. M.: Fizmatlit. P. 398. (In Russ.).
20. Sanin, V. N., Yuxhvid, V. I., Ikornikov, D. M., Andreev, D. E., Sachkova, N. V. & Alymov, M. I. (2016). SHS metallurgy of cast high-entropy alloys based on transition metals. *Dokl.*, 4(470), 421–426. (In Russ.).
21. Sanin, V. N., Ikornikov, D. M., Andreev, D. E., Sachkova, N. V. & Yuxhvid, V. I. (2017). Synthesis of cast high entropy alloys with a low specific gravity by centrifugal metallothermic SHS-methods. *Advanced Mater. Techn.*, 3, 24–33.
22. Chang, S. Y., Lin, S. Y., Huang, Y. C. & Wu, C. L. (2010). Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)_{N_x} multi-component coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 204, 3307–3314.
23. Shen, W.-J., Tsai, M.-H., Chang, Y.-S. & Yeh, J.-W. (2012). Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of (Al_{1.5}CrNb_{0.5}Si_{0.5}Ti)_{N_x} coatings. *Thin Solid Films*, 520, 6183–6188.
24. Braic, V., Vladescu, A., Balaceanu, M., Luculescu, C. R. & Braic, M. (2012). Nanostruc-

tured multi-element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C hard coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 211, 117–121.

25. Lin, M. I., Tsai, M. H., Shen, W. J. & Yeh, J. W. (2010). Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)O_x films. *Thin Solid Films*, 518, 2732–2737.

26. Zhao, Y., Zhang, J., Wang, Y., Wu, K., Liu, G. & Sun, J. (2020). Size dependent mechanical properties and deformation mechanisms in Cu/NbMoTaW nanolaminates. *Sci. China Mater.*, 63, 444–452.

27. Cao, Z. H., Ma, Y. J., Cai, Y. P., Wang, G. J. & Meng, X. K. (2019). High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable nanolayer thickness. *Scripta Mater.*, 173, 149–153.

28. Zhi yi Rong, Chaohui Wang, Ya Wang & Meiting Dong et al. (2022). Microstructure and properties of FeCoNiCrX (X=Mn,Al) high entropy alloy coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 921, 166061.

29. Guo, J., Goh, M., Zhu, Z., Lee, X., Nai, M. L. S. & Wei, J. (2018). On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials and Design*, 153, 211–220.

30. Lindner, T., Löbel, M., Sattler, B. & Lampke, T. (2019). Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding. *Surface and Coatings Technology*, 371, 389–394.

31. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Zagulyaev, D. V., Konovalov, S. V., Rubannikova, Yu. A. & Semin, A. P. (2020). Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*, 3(21), 345–362.

32. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Zagulyaev, D. V., Konovalov, S. V. & Rubannikova, Yu. A. (2022). Improvement of functional properties of alloys by electron beam treatment. *Steel in Translation*, 1(52), 71–75.

Information about the authors

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics of the SB RAS.

V. V. Shugurov – Junior Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics of the SB RAS.

A. D. Teresov – Leading Electronics Engineer, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics of the SB RAS.

M. O. Efimov – Engineer of scientific research department, Siberian State Industrial University.

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

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

I. A. Panchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovations, Siberian State Industrial University.

Yu. A. Shlyarova – Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and 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 10.08.2022; одобрена после рецензирования 17.08.2022; принята к публикации 22.08.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Aug. 22; approved after reviewing on 17 Aug. 22; accepted for publication on 22 Aug. 22.