МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ / MATERIAL SCIENCE



удк 536.425:539.25:539.351 DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-427-433



Оригинальная статья Original article

Структура и свойства поверхностного слоя ВЭС после электронно-ионно-плазменной обработки

Ю. Ф. Иванов¹, В. В. Шугуров¹, А. Д. Тересов¹,

Е. А. Петрикова¹, М. О. Ефимов²

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3) ² Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

💌 yufi55@mail.ru

- Аннотация. Высокоэнтропийные сплавы (BЭС) являются наиболее активно исследуемыми материалами последних десятилетий. В настоящей работе ВЭС неэквиатомного состава AlCrFeCoNi изготовлен по технологии холодного переноса металла и исследован методами современного физического материаловедения. Выполнен анализ элементного и фазового составов, дефектной субструктуры и трибологических свойств поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате комплексной обработки, которая сочетает напыление пленки (B + Cr) и облучение импульсным электронным пучком в среде аргона. В исходном состоянии сплав имеет простую кубическую решетку с параметром 0,28795 мкм, средний размер зерна ВЭС составляет 12,3 мкм. Химический состав: 33,4 % Al; 8,3 % Cr; 17,1 % Fe; 5,4 % Co; 35,7 % Ni (ar.). Элементы распределены квазипериодически. Выявлен режим облучения (плотность энергии пучка электронов 20 Дж/см²; длительность облучения 200 мкс, количество импульсов 3; частота импульсов 0,3 с⁻¹), который позволяет повысить микротвердость (почти в два раза) и износостойкость (более чем в пять раз), снизить коэффициент трения в 1,3 раза. При плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см² поверхность фрагментируется сеткой микротрещин. Размеры фрагментов изменяются в пределах 40 200 мкм. Увеличение плотности энергии пучка электронов ВЭС является однофазным материалом, имеет простую кубическую кристаллическую решетку. Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к формированию субзеренной структуры (150 200 нм). Высказывается предположение, что увеличение прочностных и трибологических свойств ВЭС обусловлено существенным (в 4,5 раза) снижением среднего размера зерна, формированием частиц оксиборидов хрома и алюминия, внедрением атомов бора в кристаллическую решетку ВЭС.
- Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, технология холодного переноса металла, система пленка/подложка, электронно-ионно-плазменная обработка, элементный и фазовый состав, дефектная структура
- *Благодарности:* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00183), https://rscf.ru/project/19-19-00183/ модифицирование ВЭС, исследование структуры и свойств модифицированного слоя ВЭС; при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452) изготовление образцов ВЭС с помощью технологии холодного переноса металла.
- Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Ефимов М.О. Структура и свойства поверхностного слоя ВЭС после электронно-ионно-плазменной обработки. Известия вузов. Черная металлургия. 2023;66(4):427–433. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-427-433

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEA SURFACE LAYER AFTER ELECTRON-ION-PLASMA PROCESSING

Yu. F. Ivanov¹, V. V. Shugurov¹, A. D. Teresov¹,

E. A. Petrikova¹, M. O. Efimov²

¹ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

² Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

💌 yufi55@mail.ru

Abstract. High-entropy alloys (HEAs) are the most actively researched materials of recent decades. In the present work, the non-equiatomic AlCrFeCoNi wind turbine is manufactured using cold metal transfer technology and investigated by the methods of modern physical materials science.

The authors analyzed the elemental and phase compositions, defective substructure and tribological properties of the HEA surface layer formed as a result of complex processing, which combines the deposition of a film (B + Cr) and irradiation with a pulsed electron beam in an argon medium. In the initial state, the alloy has a simple cubic lattice with a lattice parameter of 0.28795 μ m, the average grain size of the HEA is 12.3 μ m. Chemical composition of the HEA is as follows, at. %: 33.4 Al; 8.3 Cr; 17.1 Fe; 5.4 Co; 35.7 Ni. The elements are distributed quasi-periodically. The irradiation mode was revealed (electron-beam energy density 20 J/cm²; irradiation duration 200 μ s, number of pulses 3; pulse frequency 0.3 s⁻¹), which allows to increase microhardness (almost twice) and wear resistance (more than by five times), to reduce the friction coefficient by 1.3 times. At an electron-beam energy density of 20 J/cm², the surface is fragmented by a grid of microcracks. Size of the fragments varies between 40 – 200 μ m. An increase in the electron-beam energy density leads to complete dissolution of the film (B + Cr). Regardless of the magnitude of the electron-beam energy density, the wind turbine is a single-phase material and has a simple cubic crystal lattice. High-speed crystallization of the surface layer leads to the formation of a subgrain structure (150 – 200 nm). It is suggested that an increase in the strength and tribological properties of wind turbines is due to a significant (by 4.5 times) decrease in the average grain size, formation of chromium and aluminum oxide particles, and introduction of boron atoms into the crystal lattice of wind turbines.

- Keywords: high-entropy alloy, cold metal transfer technology, film/substrate system, electron-ion-plasma processing, elemental and phase composition, defect structure
- Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00183 modification of HEA, study of the structure and properties of the modified HEA layer; and project No. 20-19-00452 production of HEA samples using cold metal transfer technology).
- For citation: Ivanov Yu. F., Shugurov V.V., Teresov A.D., Petrikova E.A., Efimov M.O. Structure and properties of HEA surface layer after electronion-plasma processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):427–433. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-427-433

Введение

Научный интерес к разработке и исследованию высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) связан с их уникальной микроструктурой [1; 2], композиционным составом [3] и механическими свойствами [4-6]. В отличие от традиционных сплавов, которые содержат один или два основных элемента, высокоэнтропийные сплавы состоят из нескольких основных элементов (не менее пяти), находящихся в эквимолярном или в близком к эквимолярному соотношении. Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рассмотрены в аналитических обзорах [7-9] и монографиях (например, [10]), где описаны микроструктура, свойства, термодинамика, рассмотрены результаты моделирования структуры и обсуждены новые методы получения многокомпонентных сплавов. Значительные усилия предпринимаются для решения проблемы повышения механических свойств пятикомпонентных сплавов типа MnCoCrFeNi и AlCoCrFeNi путем зернограничного упрочнения [11; 12], твердорастворного упрочнения [13-16], упрочнения выделениями [17]. Проводятся и соответствующие теоретические разработки [18]. В работе [13] предложен способ повышения прочности путем частичной аморфизации, поскольку такая структура не содержит границ зерен или дислокаций. В целях улучшения свойств поверхности ВЭС подвергают различным видам поверхностной обработки. Так, в работе [19] был проведен обзор различных методов обработки и их влияния на поверхность ВЭС CoCrFeMnNi, полученного методом селективного лазерного плавления. Были рассмотрены следующие виды обработки: электролитическое полирование, электроэрозионная обработка, фрезерование, шлифование, механическая полировка с использованием абразивов, а также комбинирование этих методов. Результаты продемонстрировали, что шлифование приводит к сглаживанию поверхности и увеличению микротвердости,

однако оставляет следы от воздействия инструмента и остаточные напряжения, которые возникают вследствие деформации микроструктуры. Механическая полировка с использованием абразивов способствует созданию сверхгладкой поверхности без подповерхностных повреждений. Электроэрозионная обработка вызывает оплавление поверхности, что приводит к увеличению остаточных напряжений и микротвердости. Применение электролитического полирования совместно с другими методами сглаживает поверхность, удаляя остаточные напряжения и повреждения, полученные при предыдущей обработке. Однако использование электролитического полирования отдельно от других методов не приводит к микрометровому уровню поверхностной шероховатости. В работе [20] проблема низкой прочности и износостойкости сплава CoCrFeMnNi, имеющего ГЦК кристаллическую решетку, была решена методом порошкового борирования (powder-pack boriding). В результате обработки был образован двойной слой, обогащенный кремнием и бором. Установлено, что микротвердость и износостойкость борированных образцов увеличиваются. Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка [9; 10]. Такая обработка обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10⁶ К/с) поверхностного слоя до заданных температур и его последующее охлаждение со скоростью 10⁴ – 10⁹ К/с за счет теплоотвода в основном в объем материала. В результате в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния.

Целью настоящей работы является анализ элементного и фазового составов, дефектной субструктуры поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате комплексной обработки, сочетающей напыление пленки (B + Cr) и облучение импульсным электронным пучком.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использован высокоэнтропийный сплав элементного состава AlCrFeCoNi, полученный по технологии холодного переноса металла [20]. Размеры образцов 15×15×5 мм. Обработку поверхностного слоя ВЭС проводили следующим образом: *l* – формировали систему «пленка/подложка» (напыляли пленку бора толщиной 0,5 мкм, поверх пленки бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм); 2 – облучали систему «пленка (В) + пленка (Сг)/ВЭС (подложка)» импульсным электронным пучком. Формирование пленки бора на поверхности образцов ВЭС осуществляли методом плазменно-ассистированного высокочастотного распыления (ВЧ-распыления) катода из порошка бора при следующих параметрах процесса: мощность W = 800 Вт; частота f = 13,56 МГц; длительность процессов t = 35 мин (что соответствовало толщине пленки бора 0,5 мкм); ток плазмогенератора «ПИНК» $I_{\rm H} = 50$ А; ток накала $I_{\rm H} = 145$ А; напряжение смещения $U_{\rm cm} = 50$ 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 $I_{\rm g} = 80 \text{ A}; I_{\rm n} = 20 \text{ A}; I_{\rm h} = 135 \text{ A};$ коэффициент заполнения 75 %; U_{см} = 35 В; p = 0,3 Па; время напыления хрома – 10 мин. Облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах процесса: 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 (аргона) 0,02 Па. При данных параметрах облучения, как показали предварительно выполненные исследования [10], температура поверхностного слоя системы «пленка (B + Cr)/подложка (BЭC)» превышает температуру плавления ВЭС. Следовательно, можно ожидать реализации процесса формирования (на стадии высокоскоростного нагрева) расплавленного поверхностного слоя образцов ВЭС, легированного атомами бора и хрома, и (на стадии высокоскоростного охлаждения) субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры, упрочненной боридами.

Исследования элементного и фазового составов и состояния дефектной субструктуры системы «пленка (Cr + B)/подложка (ВЭС)» 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 Си-К_{а1}; монохроматор СМ-3121. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Подбор режима напыления пленок бора и хрома с целью получения необходимой толщины пленки осуществляли путем выполнения тестировочных экспериментов, используя прибор Calotest CAT-S-0000, предназначенный для определения толщины напыляемых пленок. Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПМТ-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 Al₂O₂ 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.

Результаты и их обсуждение

Высокоэнтропийный сплав, сформированный методом аддитивных технологий, имеет дендритное строение. Дендриты являются поликристаллическими агрегатами со средним размером зерен 12,3 мкм. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что ВЭС сформирован химическими элементами Al, Cr, Fe, Co, Ni в следующем соотношении, % (ат.): Al 33,4; Cr 8,3; Fe 17,1; Co 5,4; Ni 35,7.

Методом картирования осуществлена визуализация распределения атомов в объеме сплава. Показано, что границы зерен и дендритов обогащены атомами хрома и железа; объем зерен обогащен атомами алюминия и никеля; атомы кобальта распределены в объеме сплава квазиоднородно.

Методами рентгенофазового анализа показано, что исследуемый сплав имеет простую кубическую кристаллическую решетку; параметр кристаллической решетки составляет 0,28795 нм.

Облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком приводит к существенному изменению механических и трибологических свойств образцов. Во-первых, существенно увеличивается микротвердость; максимальное значение достигается после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов (E_s) 20 Дж/см² (рис. 1, *a*). Во-вторых, повышается износостойкость образцов и снижается коэф-



Рис. 1. Зависимость микротвердости (*a*), параметра износа (б) и коэффициента трения (в) поверхностного слоя системы «пленка/ подложка» от плотности энергии пучка электронов. В исходном состоянии ВЭС (без напыленной пленки и без облучения) микротвердость 4,7 ГПа, параметр износа 14·10⁻⁵ мм³/(Н·м), коэффициент трения 0,65

Fig. 1. Dependence of microhardness (*a*), wear parameter (δ) and friction coefficient (*s*) of the film/substrate system surface layer on electron-beam energy density. In the initial state of wind turbine (without a sprayed film and irradiation), microhardness is 4.7 GPa, wear parameter is $14 \cdot 10^{-5}$ mm³/(N·m), friction coefficient is 0.65

фициент трения, достигая наилучших значений после облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см² (рис. 1, *б*, *в*).

Очевидно, что изменение механических и трибологических свойств сплава обусловлено преобразованием структуры поверхностного слоя образцов. Установлено, что при облучении системы «пленка/подложка» пучком электронов с плотностью энергии 20 Дж/см² поверхность образца фрагментируется сеткой микротрещин (рис. 2, *a*). Размер фрагментов изменяется в пределах от 40 до 200 мкм при среднем размере 104 мкм. В объеме фрагментов выявляется зеренная структура (рис. 2, *в*). Средний размер зерен составляет 2,7 мкм, что в 4,5 раза меньше среднего размера зерен ВЭС в исходном состоянии. С увеличением плотности энергии пучка электронов средний размер зерен поверхностного слоя ВЭС возрастает и при $E_s = 40 \text{ Дж/см}^2$ составляет 19 мкм. Очевидно, что многократное уменьшение среднего размера зерен поверхностного слоя ВЭС при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ является одной из причин повышения прочностных свойств сплава (эффект Холла-Петча).

Облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком при $E_s = 20$ Дж/см² не приводит к полному растворению пленки. Наблюдаются протяженные прослойки пленки, расположенные в объеме и вдоль границ фрагментов, и островки пленки, расположенные в стыках фрагментов (рис. 2, б, в).



Рис. 2. Структура системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см²

Fig. 2. Structure of the film/substrate system irradiated by a pulsed electron beam at energy density of 20 J/cm²

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 30 Дж/см² и далее до 40 Дж/см² приводит к полному растворению пленки (B + Cr) (рис. 3). Как и в предыдущем случае, поверхность образцов фрагментируется сеткой микротрещин, что указывает на высокий уровень растягивающих напряжений, формирующихся в поверхностном слое образцов при облучении сплава.

Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к формированию субзеренной структуры (структура высокоскоростной кристаллизации) (рис. 3, *в*). При $E_s = 20$ Дж/см² субзеренная структура наблюдается весьма редко; при $E_s = 30$ Дж/см² субзеренная структура формируется в стыках границ зерен



Рис. 3. Структура системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см² (*a*) и 40 Дж/см² (*б*, *в*)

Fig. 3. Structure of the film/substrate system irradiated by a pulsed electron beam at energy density of 30 J/cm² (a) and 40 J/cm² (δ , ϵ)

и фрагментов; при $E_s = 40 \text{ Дж/см}^2$ субзерна формируются по всей поверхности образца. Размер субзерен не зависит от плотности энергии пучка электронов и составляет 150 - 200 нм.

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.

Островки, формирующиеся на поверхности ВЭС при облучении системы «пленка/подложка» пучком электронов при плотности энергии пучка электронов 30 и 40 Дж/см², обогащены атомами хрома, алюминия и кислорода.

Таким образом, результаты микрорентгеноспектрального анализа позволяют констатировать формирование на поверхности ВЭС в результате облучения системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком оксиборидов хрома и алюминия, количество которых снижается с увеличением плотности энергии пучка электронов. Формирование оксиборидов также будет способствовать повышению микротвердости и износостойкости ВЭС.

Фазовый состав поверхностного слоя ВЭС, модифицированного в результате облучения системы «пленка/ подложка» импульсным электронным пучком, исследовали методами рентгенофазового анализа. Независимо от величины E_s сплав является однофазным материалом, имеющим простую кубическую кристаллическую решетку.

Параметр кристаллической решетки неоднозначно зависит от величины E_s (рис. 4). Одной из причин изменения параметра кристаллической решетки сплава является легирование образцов атомами бора, концентрация которых в объеме сплава (судя по результатам, полученным методами сканирующей электронной микроскопии) будет увеличиваться с ростом плотно-



Рис. 4. Зависимость параметра кристаллической решетки поверхностного слоя системы «пленка/подложка» от плотности энергии пучка электронов

Fig. 4. Dependence of crystal lattice parameter of the film/substrate system surface layer on electron beam energy density

сти энергии в интервале 20 – 30 Дж/см². Следует отметить, что располагаться 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. Наличия упрочняющих фаз в исследуемом сплаве методами рентгенофазового анализа не обнаружено, что может быть обусловлено их малым количеством.

Выводы

С использованием технологии холодного переноса металла изготовлены образцы высокоэнтропийного сплава неэквиатомного элементного состава AlCrFeCoNi. Осуществлена комплексная обработка поверхностного слоя образцов ВЭС, сочетающая формирование системы «пленка (Cr + B)/подложка (ВЭС)» и последующее облучение импульсным электронным пучком при различных (20 – 40 Дж/см²) значениях плотности энергии пучка электронов. Выявлен режим облучения (плотность энергии пучка электронов 20 Дж/см²; длительность облучения 200 мкс, количество импульсов 3; частота импульсов 0,3 с⁻¹), позволяющий существенно повысить микротвердость (почти в два раза) и износостойкость (более чем в пять раз), снизить коэффициент трения в 1,3 раза. В результате выполненных исследований структуры и фазового состава высказано предположение, что увеличение прочностных и трибологических свойств ВЭС обусловлено существенным (в 4,5 раза) снижением среднего размера зерен, формированием частиц оксиборидов хрома и алюминия, внедрением атомов бора в кристаллическую решетку ВЭС.

Список литературы / References

- 1. 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;29(9):2221–2230. https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006
- Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and properties evolutions of high-entropy alloy: A review. *Metals and Materials International*. 2020;26:1099–1133. https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multicomponent-based nano-high-entropy alloys-NHEAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;139:207–216. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z
- George E.P., Curtin W.A., Tasan C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020;188:435–474. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015
- 5. 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;478:478–486. *https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203*

6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448–511.

https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081

- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22. https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8
- 8. 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;64(4):249–258.

https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258

Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(4):249–258. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258

9. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Рубанникова Ю.А., Семин А.П. Перспективы применения поверхностной обработки сплавов электронными пучками в современных технологиях. *Успехи физики металлов.* 2020;21(3):345–362. https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345

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 electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*. 2020;21(3):345–362.

https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345

- **10.** Gromov V.E., Konovalov S.V., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High Entropy Alloys.* Springer; 2021;110.
- Wu Z., Bei H., Pharr G.M., George E.P. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures. *Acta Materialia*. 2014;81:428–441. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026
- Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippan R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2015;96:258–268. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025
- 13. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and mediumentropy alloys. *Intermetallics*. 2013;39:74–78. *https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018*
- 14. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Scientific Reports*. 2017;7:40704. https://doi.org/10.1038/srep40704
- Xiao L.L., Zheng Z.Q., Guo S.W., Huang P., Wang F. Ultrastrong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys. *Materials and Design*. 2020;194:108895. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108895
- 16. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys. *Acta Mate-*

rialia. 2019;175:66–81. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006

 Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Körmann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Physical Review Materials*. 2019;3(11):113603.

https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603

18. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Mate-*

Сведения об авторах

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН ORCID: 0000-0001-8022-7958 *E-mail:* yufi55@mail.ru

Владимир Викторович Шугуров, научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН ORCID: 0000-0001-6148-9442 *E-mail:* shugurov@inbox.ru

Антон Дмитриевич Тересов, старший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН ORCID: 0000-0002-5363-0108 E-mail: tad514@sibmail.com

Елизавета Алексеевна Петрикова, младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН *ORCID:* 0000-0002-1959-1459 *E-mail:* elizmarkova@yahoo.com

Михаил Олегович Ефимов, соискатель степени к.т.н. кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет *ORCID:* 0000-0002-4890-3730 *E-mail:* moefimov@mail.ru rialia. 2016;118:152–163. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038

- Guo J., Goh M., Zhu Z., Lee X., Nai M.L.S., Wei J. On the machining of selective laser melting CoCrFeMnNi highentropy alloy. *Materials and Design*. 2018;153:211–220. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.012
- 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;371: 389–394. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017

Information about the Authors

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0001-8022-7958 E-mail: yufi55@mail.ru

Vladimir V. Shugurov, Research Associate of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0001-6148-9442 E-mail: shugurov@inbox.ru

Anton D. Teresov, Senior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0002-5363-0108 E-mail: tad514@sibmail.com

Elizaveta A. Petrikova, Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences *ORCID:* 0000-0002-1959-1459 *E-mail:* elizmarkova@yahoo.com

Mikhail O. Efimov, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-4890-3730 *E-mail:* moefimov@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the Authors

Ю. Ф. Иванов – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

В. В. Шугуров – написание текста рукописи, получение и анализ данных, обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

А. Д. Тересов – получение и анализ данных, доработка текста. *Е. А. Петрикова* – анализ данных электронно-микроскопических исследований

М. О. Ефимов – проведение испытаний на микротвердость, анализ данных.

Yu. F. Ivanov – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

V. V. Shugurov – writing the text, obtaining and analyzing the data, reviewing publications on the article topic, obtaining data for analysis.

A. D. Teresov – obtaining and analyzing the data, finalizing the text.

E. A. Petrikova – analysis of the results of electron microscopic tests.

M. O. Efimov - conducting microhardness tests, data analysis.

 Поступила в редакцию 20.07.2022
 Receive

 После доработки 20.11.2022
 Revise

 Принята к публикации 29.03.2023
 Accepte

Received 20.07.2022 Revised 20.11.2022 Accepted 29.03.2023