

**Обзорная статья**

УДК 536.425:539.25:539.531:669.017

DOI 10.17073/0368-0797-2022-10-683-692

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2411>

ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. Е. Громов¹, С. В. Коновалов¹, О. А. Перегудов²,
М. О. Ефимов¹, Ю. А. Шлярова¹

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

² Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

Аннотация. Авторы выполнили краткий обзор публикаций зарубежных и отечественных исследований за последние годы, в которых изучаются структуры, фазовые составы и свойства пленок и покрытий пятикомпонентных высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) на различные подложки и модифицирование поверхностей ВЭС различными видами обработки. В работе рассматриваются основные методы нанесения пленок и покрытий: магнетронное напыление, термическое распыление, лазерное напыление и электроосаждение. Особое внимание исследователи уделяют нанесению покрытий на нержавеющие стали и титановые сплавы. Положительное изменение трибологических, прочностных свойств и коррозионной стойкости пленочных покрытий проявляется в широком интервале температур. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых эффектов с учетом роли твердорастворного упрочнения, формирования мелкозернистой структуры, образования оксидных слоев, обогащенных одним из компонентов ВЭС. Выделены новые способы нанесения покрытий из ВЭС и последующей обработки. Роль ниобия и титана в увеличении микротвердости, износостойкости и снижении коэффициента трения в покрытиях рассматривается на примере легирования этими элементами. Среди методов обработки поверхности ВЭС применяют электролитическое полирование, электроэрозионную обработку, механическую полировку и их комбинации. В ряде работ для повышения поверхностной прочности и износостойкости ВЭС предлагается использовать методику порошкового борирования. Проанализированы работы по одному из перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения ВЭС – электронно-пучковой обработке.

Ключевые слова: покрытия, пленки, высокоэнтропийные сплавы, методы нанесения, трибологические свойства, механические свойства, износостойкость

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-19-00452.

Для цитирования: Громов В.Е., Коновалов С.В., Перегудов О.А., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А. Покрытия из высокоэнтропийных сплавов: состояние проблемы и перспективы развития // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 10. С. 683–692.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-683-692>

Review article

COATINGS FROM HIGH-ENTROPY ALLOYS: STATE AND PROSPECTS

V. E. Gromov¹, S. V. Konovalov¹, O. A. Peregudov²,
M. O. Efimov¹, Yu. A. Shlyarova¹

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

² Omsk State Technical University (11 Mira Ave., Omsk 644050, Russian Federation)

Abstract. The authors made a brief review of recent publications by foreign and domestic researchers on the structure, phase composition, and properties of films and coatings of five-component high-entropy alloys (HEA) on various substrates and modification of the HEA surface by various types of processing. The main methods of applying films and coatings are considered: magnetron sputtering, thermal sputtering, laser sputtering, and electrodeposition. Particular attention is paid to the deposition of coatings on stainless steels and titanium alloys. The positive change in the tribological, strength properties, and corrosion resistance of film coatings in a wide temperature range is analyzed and possible causes of the observed effects are discussed. The role of solid solution strengthening, formation of fine-grained structure, and the formation of oxide layers enriched with one of the HEA components were taken into account. The authors identified new methods for applying coatings from HEA and subsequent processing. Using Nb and Ti doping as an example, their role in increasing microhardness, wear resistance, and reducing the friction coefficient in coatings were revealed. Electrolytic polishing, electroerosive machining, mechanical polishing and their combination are considered among the methods of HEA surface treatment. A number of works propose a method of powder borating to increase the surface strength and wear resistance of HEAs. The paper considers analysis of works on electron-beam processing as one of the promising and high efficient methods of HEA surface hardening.

Keywords: coatings, films, high-entropy alloys, application methods, tribological properties, mechanical properties, wear resistance

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452).

For citation: Gromov V.E., Kononov S.V., Peregudov O.A., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A. Coatings from high-entropy alloys: State and prospects. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 10, pp. 683–692. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-683-692>

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой новый класс материалов, состоящих из не менее пяти элементов, находящихся в эквИАтомном или близком к эквИАтомному соотношении, что обеспечивает им в отличие от традиционных сплавов уникальные свойства [1]. Концепция ВЭС построена на идее, что высокая энтропия смешения может способствовать образованию стабильных однофазных микроструктур [2], что не противоречит правилу фаз, основанному на законах термодинамики. Наблюдается беспрецедентный интерес во всем мире к разработке и исследованию ВЭС. Первой работой в этом направлении следует считать исследование [3], в котором атомная концентрация элементов, составляющих ВЭС, колеблется в пределах от 5 до 35 %. Особенности химического состава и структуры ВЭС приводят к так называемым «основным» эффектам (*core effects*), определяющим уникальный комплекс свойств этих материалов [4 – 7]: эффекту высокой энтропии, эффекту сильных искажений кристаллической решетки, эффекту замедленной диффузии и «коктейльному» эффекту. Первый эффект заключается в том, что уменьшение энтропии при переходе в более упорядоченное состояние перевешивает уменьшение энтальпии за счет эффекта образования упорядоченной фазы [2, 8]. Эффект искажений кристаллической решетки связан с тем, что атомы разных размеров произвольно занимают междоузлия в кристаллической решетке. Очевидно, более крупные атомы будут располагаться на максимальном расстоянии друг от друга, так как в этом случае искажения кристаллической структуры и энергия системы будут уменьшаться. Эффект замедленной диффузии связан с влиянием искажений кристаллической решетки, а также с образованием наноразмерных включений и аморфных многокомпонентных фаз при различных способах получения ВЭС [2, 9 – 12]. Этот эффект имеет большое прикладное значение, так как от скорости диффузии зависит, например, коррозионная стойкость. Строгого определения «коктейльного» эффекта нет, обычно под ним подразумевается способность сплава обладать свойствами, недоступными каждому из его составляющих в отдельности [2, 4]. Как правило, ВЭС обладает свойствами, превосходящими сумму свойств всех его компонентов.

Обобщение обширных оригинальных результатов, разбор и анализ свойств ВЭС, перспективы их применения сделаны в обзорах и монографиях [1, 15, 16]. В публикациях [17, 18] выполнен краткий обзор зару-

бежных работ последних десятилетий по изучению структурно-фазовых состояний и свойств пятикомпонентных высокоэнтропийных сплавов в широком диапазоне температур. Среди работ отечественных исследователей за предшествующее пятилетие необходимо отметить публикации [19 – 24], в которых изучено влияние состава на механические свойства и параметры тонкой структуры моно- и поликристаллических ВЭС, полученных различными методами.

В последнее пятилетие несмотря на огромное число публикаций по ВЭС и существующие при этом серьезные проблемы, проанализированные в работах [1, 2, 15, 16], наметились два принципиально новых направления в физике ВЭС: улучшение свойств поверхности путем создания тонких покрытий и пленок; модифицирование поверхности ВЭС различными видами обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди многочисленных методов нанесения пленок или покрытий из ВЭС необходимо остановиться на четырех из них, обладающих рядом преимуществ: магнетронное напыление [25], термическое распыление [26], лазерное напыление [27, 28], электроосаждение [29]. Использование покрытий из ВЭС вместо объемных, с одной стороны, значительно снижает стоимость изделий, с другой, – значительно расширяет области применения [29].

Магнетронное напыление

Первые такие работы были выполнены для получения покрытий из многокомпонентных карбидов, нитридов и оксидов [30 – 33]. В последнее время методом магнетронного напыления получены многослойные наноструктурные ламинаты [34, 35]. Необходимо остановиться на новом методе получения наночастиц ВЭС с покрытием из многослойного графена [36], который может быть полезен при механическом синтезе ВЭС. Магнетронное напыление ВЭС дает возможность получать высокооднородные тонкие покрытия, свойства которых значительно превосходят свойства подложки. Так, нанесение пленки ВЭС CrNbTiMoZr прямоточным магнетронным напылением на нержавеющую сталь 304 (Международная классификация) обеспечивает нанотвердость 9,7 ГПа и отличные трибологические свойства [37]. Испытания полученного магнетронным напылением пяти мишеней AlTiCrNiTa покрытия на сталь X80 продемонстрировали хлоридную корро-

зионную стойкость и плотность системы пленка – подложка [38] при эксплуатации. В работе [39] проведен анализ коррозионной стойкости пленок на основе AlCrTiV с добавлением меди, молибдена и Cu/Мо присадок, нанесенных магнетронным напылением на нержавеющую сталь 304, и обосновано, что все покрытия обладают свойствами, значительно превосходящими свойства подложки, за счет образования стабильных оксидов Al₂O₃, Cr₂O₃ и других.

Лазерные покрытия

Публикаций, посвященных лазерному способу нанесения покрытий, значительно больше, чем магнетронному. Пленки ВЭС FeNiCoCrMo_x (x = 0; 0,15; 0,20; 0,25), нанесенные на нержавеющие стали 304 и 316, обеспечивали увеличение микротвердости на 90,5 % относительно подложки, снижение скорости изнашивания на 38,9 %. Снижение коэффициента трения и рост коррозионной стойкости обусловлены, по мнению авторов, влиянием оксида MeO₃ на пассивирующее покрытие [39]. Нержавеющая сталь 304 с покрытиями различных ВЭС является предметом тщательных многочисленных исследований [40 – 44]. Изучение AlCoCrFeNi, AlCoCrFeMo, FeCoCrMnTi покрытий [45] свидетельствует о положительном изменении трибологических, прочностных свойств пленочных покрытий и коррозионной стойкости. Для борьбы с высокотемпературным износом, где основными механизмами являются окисление и абразивный износ, авторы работы [46] предлагают использовать AlCrFeMnNi ВЭС покрытия, обладающие защитным эффектом благодаря созданию оксидной защитной пленки, которая заметно снижает коэффициент трения и параметр износа до 0,48 и 1,25·10⁻⁴ мм³/(Н·м) соответственно при 400 °С. Лазерное воздействие, обеспечивающее переплав поверхности стали Cr13, упрочненной высокоэнтропийным FeCrCoAl_x покрытием, приводит к однородному распределению элементов в объемно-центрированной решетке благодаря повышенной энтропии смешения и образованию оксидных пленок состава AlO_x и CrO_x. Все это обеспечивает значительно повышенное сопротивление коррозии [47]. Двухслойное CoCrFeMnTi_{0,2} ВЭС покрытие, сформированное на стали 15CrMn, обладает микротвердостью 428,26 HV_{0,3}, что в 3,5 раза превосходит микротвердость объемного ВЭС CoCrFeMnNi. Это достигается за счет твердорастворного упрочнения, упрочнения выделениями и мартенситного превращения. Механизмы износа – абразивный и окислительный, скорость коррозии 0,131 мкм/год. Основная роль в этом принадлежит многозеренной структуре покрытия и наличию высокопассивирующих элементов [48].

Введение в ВЭС легирующих элементов заметно влияет на структурно-фазовое состояние и свойства покрытий пятикомпонентного сплава [49]. Высокоэнтропийный сплав FeNiCoCrTi_{0,5}Nb_x (x = 0,25; 0,50; 0,75;

1,00) содержит ОЦК, ГЦК и фазы Лавеса. Верхняя и нижняя части покрытия представлены равноосными и столбчатыми кристаллами, а сердцевина содержит дендриты различной формы и структуру в виде полос. Твердость всех покрытий значительно превосходит твердость матрицы, а наибольшее значение 852,5 HV (в 2,9 раза превышающее твердость матрицы) наблюдается у покрытия состава FeNiCoCrTi_{0,5}Nb_{0,5} (рис. 1). Оно же обладает наименьшей скоростью абразивного изнашивания.

В процессе нанесения покрытия ВЭС FeCoNiCrMnTi_x (x = 0; 0,5; 1,0; 1,5) на нержавеющую сталь 30У формируются упрочняющие частицы TiN, ответственные за улучшенные механические и трибологические свойства [50]. С ростом содержания титана увеличиваются износостойкость, микротвердость (рис. 2), коррозионная стойкость, снижается коэффициент трения.

В аэрокосмической отрасли титановые сплавы, такие как Ti-6Al-4V, находят широкое применение, однако имеют ряд недостатков, в частности, низкие износостойкость, твердость и сопротивление хлоридной коррозии. Это во многом устраняется лазерным нанесением покрытий ВЭС [51], имеющих отличную связь с подложкой Ti-6Al-4V и обеспечивающих поверхностную твердость и коррозионную стойкость. Покрытие TiZrAlNbCo ВЭС обеспечивает твердость 768,9 HV и великоплетное сопротивление коррозии ($I_{корр} = 3,66 \cdot 10^{-9}$ А/см²). Это связано с формированием ГЦК фазы. Широкое использование CoCrFeNiMo_{0,2} покрытия, состоящего из ОЦК структуры с σ-фазами и имеющего однородную дендритную структуру, обус-

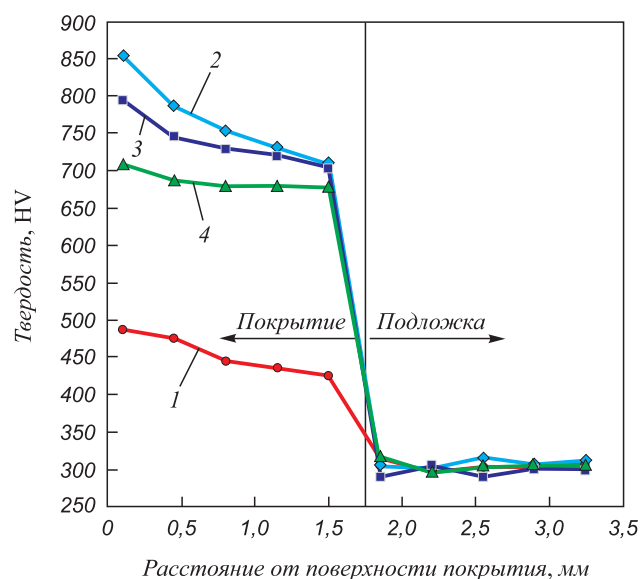


Рис. 1. Изменение твердости по глубине покрытия FeNiCoCrTi_{0,5}Nb_x при различных значениях x [49]: 1 – 0,25; 2 – 0,50; 3 – 0,75; 4 – 1,00

Fig. 1. Change in hardness by FeNiCoCrTi_{0,5}Nb_x coating depth at different values of x [49]: 1 – 0.25; 2 – 0.50; 3 – 0.75; 4 – 1.00

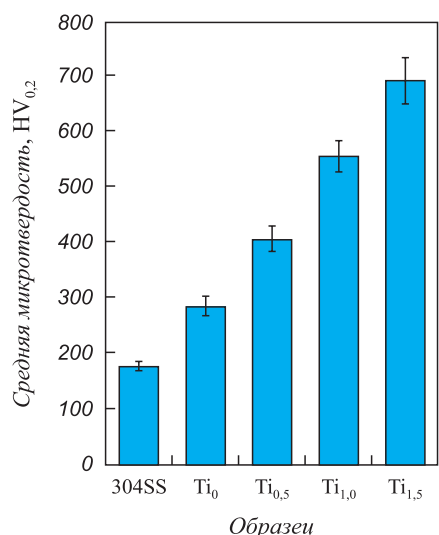


Рис. 2. Зависимость микротвердости покрытия ВЭС FeCoNiCrMnTi_x от содержания титана [50]

Fig. 2. Dependence of microhardness of FeCoNiCrMnTi_x HEA coating on titanium content [50]

ловлено высокой (~900 HV_{0,1}) твердостью, в 2,3 раза превышающей твердость подложки. При 600 °С такое покрытие обладает хорошей износостойкостью [52]. Улучшенные поверхностные свойства связаны с комбинированным вкладом твердорастворного упрочнения и мелкозернистой структуры, а также наличием оксидных слоев, обогащенных хромом.

Среди новых способов нанесения покрытий из ВЭС и последующей обработки следует остановиться на работе [53], в которой проанализированы результаты изучения микроструктуры, фазового состава, ориентации

зерен, морфологии поверхности NiFeCrNbTiAl ВЭС покрытия, сформированного отложением сверхзвуковых частиц с последующим лазерным облучением. Схема процесса сверхзвукового отложения частиц и технологические параметры приведены на рис. 3. Мощность лазерного облучения 800 Вт. Аргон использован для защиты от окисления при лазерной обработке. Такая комбинированная технология обеспечила следующие параметры изделия: предел усталости 252 МПа, предел прочности 3000 МПа, относительное удлинение 14 %, коэффициент трения 0,189, микротвердость 72 ГПа, остаточное напряжение 14,3 МПа. Эти показатели обеспечены изотропной субмикро- и наноразмерной зеренной структурой.

В целях улучшения свойств поверхности ВЭС подвергаются различным видам поверхностной обработки. Так, в работе [54] был проведен обзор различных методов обработки и их влияния на поверхность ВЭС CoCrFeMnNi, полученного методом селективного лазерного плавления. 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 способствовала созданию сверхгладкой поверхности без подповерхностных повреждений. Электроэрозионная обработка вызвала оплавление поверхности, что привело к уве-

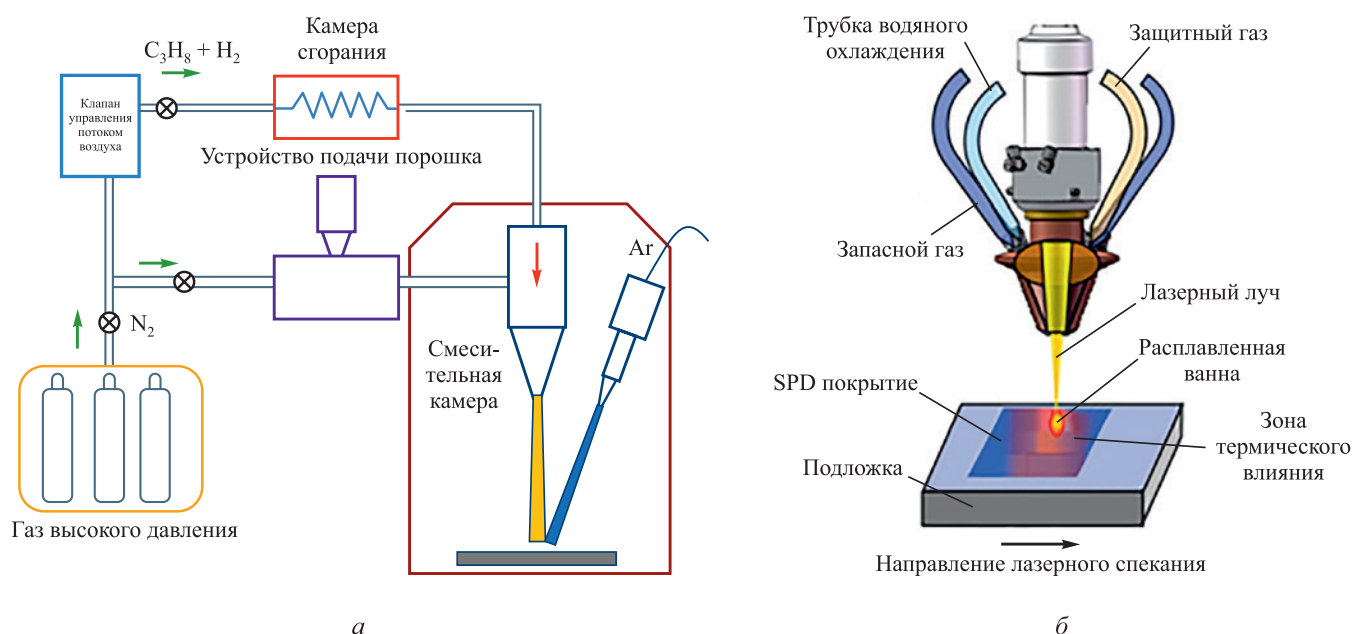


Рис. 3. Системы сверхзвукового отложения (SPD) (а) частиц и лазерного облучения (LI) (б) [53]

Fig. 3. Systems of supersonic deposition (SPD) (a) of particles and laser irradiation (LI) (b) [53]

личению остаточных напряжений и микротвердости. Применение электролитического полирования совместно с другими методами сглаживало поверхность, удаляя остаточные напряжения и повреждения, полученные при предыдущей обработке. Однако использование электролитического полирования отдельно от других методов не приводило к микрометровому уровню поверхностной шероховатости. В работе [55] проблема низкой прочности и износостойкости сплава CoCrFeMnNi , имеющего ГЦК кристаллическую решетку, была решена методом порошкового борирования (*powder-pack boriding*). В результате обработки образован двойной слой, обогащенный кремнием и бором. Установлено увеличение микротвердости и износостойкости борированных образцов. Аналогичные шаги были предприняты в работе [56], в которой методом борирования при температурах 900–1200 °С ВЭС $\text{CoCrFeNiAl}_{0,25}$, полученного методом порошковой металлургии, было достигнуто улучшение плотности, микроструктуры, совершенства поверхности и механических свойств.

По сравнению с исходным ВЭС (47,07 ГПа) модуль упругости увеличивался до 140–151 ГПа, а ударная вязкость возрастала до 3,57–4,25 МПа·м^{1/2}. Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка. Такая обработка обеспечивает сверхвысокие (до 10⁶ К/с) скорости нагрева поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основном в объем материала со скоростями 10⁴–10⁹ К/с, в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикронанокристаллические структурно-фазовые состояния [57, 58].

В работах [59–63] выполнен анализ структурно-фазовых состояний и свойств ВЭС CrMnFeCoNi и CoCrFeNiAl неэквивалентных составов, полученных методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) и подвергнутых электронно-пучковой обработке (ЭПО) с параметрами: плотность энергии пучка электронов 10–30 Дж/см², длительность 50–200 мкс, частота 0,3 с⁻¹, количество импульсов – 3. Показано, что приводящая к высокоскоростной кристаллизации расплавленного поверхностного слоя ЭПО сопровождается формированием нанокристаллической столбчатой структуры, увеличивает прочностные и пластические свойства ВЭС, гомогенизирует материал.

Облучение сплава Cantor электронными пучками с плотностью энергии 10–30 Дж/см², длительностью 50 мкс, частотой 0,3 с⁻¹, числом импульсов 3 не приводит к изменению его элементного состава, однако существенным образом преобразует его дефектную субструктуру. Во-первых, приводит к существенному (в шесть раз, от 20 до 120 мкм) увеличению среднего размера зерна; во-вторых, к формированию в поверх-

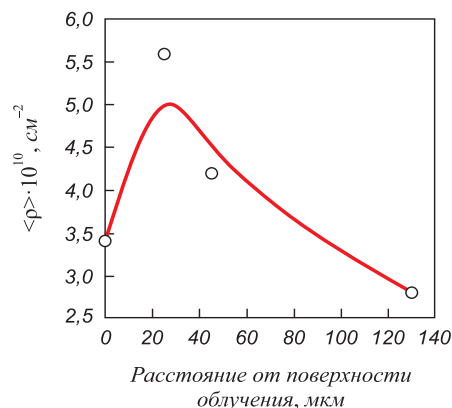


Рис. 4. Зависимость скалярной плотности дислокаций от расстояния от поверхности облучения высокоэнтропийного сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni ($E_s = 20$ Дж/см²)

Fig. 4. Dependence of scalar dislocation density on the distance from the irradiation surface of HEA of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system ($E_s = 20$ J/cm²)

ностном слое толщиной приблизительно 5 мкм структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации с размером ячеек 400–550 нм; в-третьих, к формированию текстуры высокоскоростной кристаллизации расплавленного поверхностного слоя. Показано, что облучение импульсным электронным пучком приводит к формированию градиентной дислокационной субструктуры (рис. 4). В поверхностном слое формируется неориентированная ячеистая дислокационная субструктура, в объеме ячеек которой наблюдаются хаотически распределенные дислокации. На глубине 25 мкм формируется неориентированная ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура с наибольшей плотностью дислокаций 5,5·10¹⁰ см⁻². На глубине 45 мкм, наряду с ячеисто-сетчатой дислокационной субструктурой, присутствует структура, сформированная дислокациями, распределенными хаотически. Выявлен вязкий характер разрушения ВЭС и формирование областей с пластинчатой структурой после ЭПО [64].

Выводы

В последнее пятилетие отмечен существенный рост исследований пленок и покрытий высокоэнтропийных сплавов и модифицирование поверхности различными методами. Выполнен краткий обзор и анализ публикаций по способам нанесения покрытий на нержавеющие стали и титановые сплавы, обеспечивающих улучшение трибологических и механических свойств, коррозионной стойкости в широком температурном интервале. Акцентировано внимание на анализе физических механизмов наблюдаемых эффектов. Отмечены новые аспекты нанесения покрытий и последующей обработки. Показаны возможные перспективы использования электронно-пучковой обработки для модифицирования и упрочнения поверхности ВЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer. Advanced Structured Materials. 2021. Vol. 107. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
- Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
- Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. No. 5. P. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // Progress in Materials Science. 2014. Vol. 61. P. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // Science China Materials. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А. Высокоэнтропийные сплавы – электронная концентрация – фазовый состав – параметр решетки – свойства // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 10. С. 1017–1029.
- 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 // Metallurgical and Materials Transactions: A. 2004. Vol. 35. P. 2533–2536. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0234-4>
- Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys // Annales de Chimie: Science des Materiaux. 2006. Vol. 31. No. 6. P. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
- Tong C.J., Chen Y.-L., Chen S.-K., Yeh J.-W., Shun T.-T., Tsau C.-H., Lin S.-J., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Al₁₃CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multi-principal elements // Metallurgical and Materials Transactions: A. 2004. Vol. 36. P. 881–893. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0283-0>
- Tsai K.-Y., Tsai M.-H., Yeh J.-W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. No. 13. P. 4887–4897. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.058>
- Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: A critical review // Materials Research Letters. 2014. Vol. 2. No. 3. P. 107–123. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
- 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 // Journal of Materials Research Technology. 2016. Vol. 5. No. 4. P. 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
- Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier, 2019. 374 p.
- Zhang Y. High-Entropy Materials. A Brief Introduction. Singapore: Springer Nature, 2019. 159 p.
- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических
- Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer. Advanced Structured Materials. 2021, vol. 107, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
- Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20080098>
- Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004, vol. 6, no. 5, pp. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 61, pp. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
- Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
- Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
- Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- Gorban' V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. High-entropy alloys: Interrelations between electron concentration, phase composition, lattice parameter, and properties. *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 10, pp. 970–981. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17080051>
- 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. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2004, vol. 35, pp. 2533–2536. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0234-4>
- Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*. 2006, vol. 31, no. 6, pp. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
- Tong C.J., Chen Y.-L., Chen S.-K., Yeh J.-W., Shun T.-T., Tsau C.-H., Lin S.-J., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Al₁₃CoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multi-principal elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2004, vol. 36, pp. 881–893. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0283-0>
- Tsai K.-Y., Tsai M.-H., Yeh J.-W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 13, pp. 4887–4897. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.058>
- Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: A critical review. *Materials Research Letters*. 2014, vol. 2, no. 3, pp. 107–123. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
- 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. *Journal of Materials Research Technology*. 2016, vol. 5, no. 4, pp. 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>
- Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-Entropy Alloys*. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier, 2019, 374 p.
- Zhang Y. *High-Entropy Materials. A Brief Introduction*. Singapore: Springer Nature, 2019, 159 p.
- Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
- Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Kononov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of

- свойств высокоэнтروпийного сплава Cantor // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 599–605.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
19. Горбачев И.И., Попов В.В., Кац-Демьянец А., Попов М.Л., Эшед Э. Прогнозирование фазового состава высокоэнтропийных сплавов на основе Cr–Nb–Ti–V–Zr с помощью CALPHAD-метода // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. № 4. С. 408–416. <https://doi.org/10.1134/S0015323019040065>
 20. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А., Куриленко Д.В. Роль различных параметров в формировании физико-механических свойств высокоэнтропийных сплавов с ОЦК-решеткой // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 5. С. 504–509. <https://doi.org/10.7868/S0015323018050108>
 21. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cu–Fe–Ni–Si // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 1. С. 42–50. <https://doi.org/10.7868/S001532301610003X>
 22. Шайсултанов Д.Г., Степанов Н.Д., Салищев Г.А., Тихоновский М.А. Влияние термической обработки на структуру и твердость высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV_x (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1) // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 6. С. 610–621. <https://doi.org/10.7868/S0015323017060080>
 23. Мешков Е.А., Новоселов И.И., Янликкин А.В., Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Шутов А.С., Тарасов Б.А., Данилов С.Е., Арбузов В.Л. Экспериментально-теоретическое исследование эволюции атомной структуры высокоэнтропийных сплавов на основе Fe, Cr, Ni, Mn и Co при термическом и радиационном старении // Физика твердого тела. 2020. Т. 62. № 3. С. 339–350. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.03.48995.446>
 24. Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В., Выродова А.В., Сараева А.А., Бессонова И.Г., Куксгаузен И.В., Куксгаузен Д.А. Температурная и ориентационная зависимость механических свойств монокристаллов высокоэнтропийного сплава Al_{0.3}CoCrFeNi, упрочненных некогерентными частицами β-фазы // Известия вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 1 (745). С. 121–127. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/1/121>
 25. Ma Y., Peng G.J., Wen D.H., Zhang T.H. Nanoindentation creep behavior in a CoCrFeCuNi high-entropy alloys film with two different structure states // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 621. P. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.065>
 26. Wang L.M., Chen G.G., Yeh J.W., Ke S.T. The microstructure and strengthening mechanism of thermal spray coating Ni_xCo_{0.6}Fe_{0.2}CrySi_zAlTi_{0.2} high-entropy alloys // Materials Chemistry and Physics. 2011. Vol. 126. No. 3. P. 880–885. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.12.022>
 27. Zhang H., Wu W., He Y., Li M., Guo S. Formation of core-shell structure in high-entropy alloy coating by laser cladding // Applied Surface Science. 2015. Vol. 363. P. 543–547. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.059>
 28. Gao W.Y., Chang C., Li G., Xue Y., Wang J., Zhang Z., Lin X. Study on the laser cladding of FeCrNi coating // Optik. 2019. Vol. 178. P. 950–957. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.062>
 29. Rong Z., Wang C., Wang Y., Dong M., You Y., Wang J., Liu H., Liu J., Wang Y., Zhu Z. Microstructure and properties of FeCoNiCr_x (x = Mn, Al) high-entropy alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 921. Article 166061. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166061>
 30. Chang S.-Y., Lin S.-Y., Huang Y.-C., Wu C.-L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)_{N_x} multi-component coatings // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 204. No. 20. P. 3307–3314. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.041>
 31. Shen W.-J., Tsai M.-H., Chang Y.-S., Yeh J.-W. 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. 2012. Vol. 520. No. 19. P. 6183–6188. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.06.002>
 32. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C.R., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C Cantor high-entropy alloy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 599–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>
 19. Gorbachev I.I., Popov V.V., Kats-Dem'yanets A., Popov M.L., Eshed E. Prediction of the phase composition of high-entropy alloys based on Cr–Nb–Ti–V–Zr using the Calphad method. *Physics of Metals and Metallography*. 2019, vol. 120, no. 4, pp. 378–386. <https://doi.org/10.1134/S0031918X19040069>
 20. Gorban' V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A., Kurilenko D.V. Role of various parameters in the formation of the physicomechanical properties of high-entropy alloys with BCC lattices. *Physics of Metals and Metallography*. 2018, vol. 119, no. 5, pp. 477–481. <https://doi.org/10.1134/S0031918X18050046>
 21. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al–Cu–Fe–Ni–Si alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 1, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1134/S0031918X16100033>
 22. Shaisultanov D.G., Stepanov N.D., Salishchev G.A., Tikhonovskiy M.A. Effect of heat treatment on the structure and hardness of high-entropy alloys CoCrFeNiMnV_x (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1). *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 6, pp. 579–790. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17060084>
 23. Meshkov E.A., Novoselov I.I., Yanilkkin A.V., Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Khomich A.A., Shutov A.S., Tarasov B.A., Danilov S.E., Arbuzov V.L. Experimental and theoretical study of the atomic structure evolution of high-entropy alloys based on Fe, Cr, Ni, Mn, and Co upon thermal and radiation aging. *Physics of the Solid State*. 2020, vol. 62, no. 3, pp. 389–400. <https://doi.org/10.1134/S1063783420030130>
 24. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Vyrodova A.V., Saraeva A.A., Bessonova I.G., Kuksgauzen I.V., Kuksgauzen D.A. Temperature and orientation dependence of the mechanical properties of Al_{0.3}CoCrFeNi high-entropy alloy single crystals hardened by non-coherent β-phase particles. *Russian Physics Journal*. 2020, vol. 63, no. 1, pp. 134–141. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-02012-8>
 25. Ma Y., Peng G.J., Wen D.H., Zhang T.H. Nanoindentation creep behavior in a CoCrFeCuNi high-entropy alloys film with two different structure states. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, vol. 621, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.065>
 26. Wang L.M., Chen G.G., Yeh J.W., Ke S.T. The microstructure and strengthening mechanism of thermal spray coating Ni_xCo_{0.6}Fe_{0.2}CrySi_zAlTi_{0.2} high-entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*. 2011, vol. 126, no. 3, pp. 880–885. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.12.022>
 27. Zhang H., Wu W., He Y., Li M., Guo S. Formation of core-shell structure in high-entropy alloy coating by laser cladding. *Applied Surface Science*. 2015, vol. 363, pp. 543–547. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.059>
 28. Gao W.Y., Chang C., Li G., Xue Y., Wang J., Zhang Z., Lin X. Study on the laser cladding of FeCrNi coating. *Optik*. 2019, vol. 178, pp. 950–957. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.062>
 29. Rong Z., Wang C., Wang Y., Dong M., You Y., Wang J., Liu H., Liu J., Wang Y., Zhu Z. Microstructure and properties of FeCoNiCr_x (x = Mn, Al) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 921, article 166061. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166061>
 30. Chang S.-Y., Lin S.-Y., Huang Y.-C., Wu C.-L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)_{N_x} multi-component coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2010, vol. 204, no. 20, pp. 3307–3314. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.041>
 31. Shen W.-J., Tsai M.-H., Chang Y.-S., Yeh J.-W. 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*. 2012, vol. 520, no. 19, pp. 6183–6188. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.06.002>
 32. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C.R., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)N and (TiZrNbHfTa)C

- hard coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 211. P. 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.033>
33. Lin M.-I., Tsai M.-H., Shen W.-J., Yeh J.-W. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)_xO_x films // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. No. 10. P. 2732–2737. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.142>
 34. Zhao Y., Zhang J., Wang Y., Wu K., Liu G., Sun J. Size-dependent mechanical properties and deformation mechanisms in Cu/NbMoTaW nanolaminates // *Science China Materials*. 2020. Vol. 63. No. 3. P. 444–452. <https://doi.org/10.1007/s40843-019-1195-7>
 35. 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 Materialia*. 2019. Vol. 173. P. 149–153. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.08.018>
 36. Xu H., Zang J., Yuan Y., Zhou Y., Tian P., Wang Y. In-situ assembly from graphene encapsulated CoCrFeMnNi high-entropy alloy nanoparticles for improvement corrosion resistance and mechanical properties in metal matrix composites // *Journal of Alloys Compounds*. 2019. Vol. 811. Article 152082. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152082>
 37. Wang Y., Kuang S., Yu X., Wang L., Huang W. Tribo-mechanical properties CrNbTiMoZv high-entropy alloy films synthesized by direct magnetron sputtering // *Surface and Coating Technology*. 2020. Vol. 403. Article 126374. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126374>
 38. Zhao S., He L.-xin, Fan X.-xia, Liu C.-hai, Long J.-ping, Wang L., Chang H., Wang J., Zhang W. Microstructure and chloride corrosion property of nanocrystalline AlTiCrNiNa high entropy alloy coating on X80 pipeline steel // *Surface and Coating Technology*. 2019. Vol. 375. P. 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.033>
 39. Wu H., Zhang S., Wang Z.Y., Zhang C.H., Chen H.T., Chen J. New studies on wear and corrosion behavior of laser cladding FeNiCoCrMo_x high-entropy alloy coating: the role of Mo // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022. Vol. 102. Article 105721. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105721>
 40. Ye F., Jiao Z., Yan S., Guo L., Feng L., Yu J. Microbeam plasma arc remanufacturing: effects of Al on microstructure, wear resistance, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance of Al_xCoCrFeMnNi high-entropy alloy cladding layer // *Vacuum*. 2020. Vol. 174. Article 109178. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109178>
 41. Zhang G., Liu H., Tian X., Chen P., Yang H., Hao J. Microstructure and properties of AlCoCrFeNiSi high-entropy alloy coating on AISI 304 stainless steel by laser cladding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 278–288. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04586-3>
 42. Liu H., Zhang T., Sum S., Zhang G., Tian X., Chen P. Microstructure and dislocation density of AlCoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coatings by laser cladding // *Materials Letters*. 2021. Vol. 283. Article 128746. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128746>
 43. Ye Q., Feng K., Li Z., Lu F., Li R., Huang J., Wu Y. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy coating // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 396. P. 1420–1426. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.176>
 44. Jiang H., Han K., Li D., Cao Z. Synthesis and characterization of AlCo-CrFeNiNb_x high entropy alloy coatings by laser cladding // *Crystals*. 2019. Vol. 9. No. 1. Article 56. <https://doi.org/10.3390/cryst9010056>
 45. Liu S.S., Zhang M., Zhao G., Wang X.H., Wang J.F. Microstructure and properties of ceramic particle reinforced FeCoNiCrMnTi high entropy alloy laser cladding coating // *Intermetallics*. 2022. Vol. 140. Article 107402. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107402>
 46. Zhong M., Wang D., He L., Ye X., Ouyang W., Xu Z., Zhang W., Zhou X. Microstructure and elevated temperature wear behavior of laser cladding NiMnFeCrAl high entropy alloy coating // *Optics and Laser Technology*. 2022. Vol. 149. Article 107845. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107845>
 - hard coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2012, vol. 211, pp. 117–121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.09.033>
 33. Lin M.-I., Tsai M.-H., Shen W.-J., Yeh J.-W. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)_xO_x films. *Thin Solid Films*. 2010, vol. 518, no. 10, pp. 2732–2737. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.10.142>
 34. Zhao Y., Zhang J., Wang Y., Wu K., Liu G., Sun J. Size-dependent mechanical properties and deformation mechanisms in Cu/NbMoTaW nanolaminates. *Science China Materials*. 2020, vol. 63, no. 3, pp. 444–452. <https://doi.org/10.1007/s40843-019-1195-7>
 35. 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 Materialia*. 2019, vol. 173, pp. 149–153. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.08.018>
 36. Xu H., Zang J., Yuan Y., Zhou Y., Tian P., Wang Y. In-situ assembly from graphene encapsulated CoCrFeMnNi high-entropy alloy nanoparticles for improvement corrosion resistance and mechanical properties in metal matrix composites. *Journal of Alloys Compounds*. 2019, vol. 811, article 152082. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152082>
 37. Wang Y., Kuang S., Yu X., Wang L., Huang W. Tribo-mechanical properties CrNbTiMoZv high-entropy alloy films synthesized by direct magnetron sputtering. *Surface and Coating Technology*. 2020, vol. 403, article 126374. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126374>
 38. Zhao S., He L.-xin, Fan X.-xia, Liu C.-hai, Long J.-ping, Wang L., Chang H., Wang J., Zhang W. Microstructure and chloride corrosion property of nanocrystalline AlTiCrNiNa high entropy alloy coating on X80 pipeline steel. *Surface and Coating Technology*. 2019, vol. 375, pp. 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.033>
 39. Wu H., Zhang S., Wang Z.Y., Zhang C.H., Chen H.T., Chen J. New studies on wear and corrosion behavior of laser cladding FeNiCoCrMo_x high-entropy alloy coating: the role of Mo. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022, vol. 102, article 105721. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105721>
 40. Ye F., Jiao Z., Yan S., Guo L., Feng L., Yu J. Microbeam plasma arc remanufacturing: effects of Al on microstructure, wear resistance, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance of Al_xCoCrFeMnNi high-entropy alloy cladding layer. *Vacuum*. 2020, vol. 174, article 109178. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109178>
 41. Zhang G., Liu H., Tian X., Chen P., Yang H., Hao J. Microstructure and properties of AlCoCrFeNiSi high-entropy alloy coating on AISI 304 stainless steel by laser cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020, vol. 29, pp. 278–288. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04586-3>
 42. Liu H., Zhang T., Sum S., Zhang G., Tian X., Chen P. Microstructure and dislocation density of AlCoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coatings by laser cladding. *Materials Letters*. 2021, vol. 283, article 128746. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128746>
 43. Ye Q., Feng K., Li Z., Lu F., Li R., Huang J., Wu Y. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy coating. *Applied Surface Science*. 2017, vol. 396, pp. 1420–1426. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.176>
 44. Jiang H., Han K., Li D., Cao Z. Synthesis and characterization of AlCo-CrFeNiNb_x high entropy alloy coatings by laser cladding. *Crystals*. 2019, vol. 9, no. 1, article 56. <https://doi.org/10.3390/cryst9010056>
 45. Liu S.S., Zhang M., Zhao G., Wang X.H., Wang J.F. Microstructure and properties of ceramic particle reinforced FeCoNiCrMnTi high entropy alloy laser cladding coating. *Intermetallics*. 2022, vol. 140, article 107402. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107402>
 46. Zhong M., Wang D., He L., Ye X., Ouyang W., Xu Z., Zhang W., Zhou X. Microstructure and elevated temperature wear behavior of laser cladding NiMnFeCrAl high entropy alloy coating. *Optics and Laser Technology*. 2022, vol. 149, article 107845. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107845>

47. Zhang P., Xu Z., Yao Z., Liu Y., Lin S., He M., Lu S., Wu X. A high-corrosion-resistant high-entropy alloys (HEAs) coatings with single BCC solid solution structure by laser remelting // *Materials Letters*. 2022. Vol. 324. Article 132728. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132728>
48. Liu H., Li X., Liu J., Gao W., Du X., Hao J. Microstructural evolution and properties of dual-layer CoCrFeMnTi_{0.2} high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding // *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 134. Article 106646. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106646>
49. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating // *Optik*. 2019. Vol. 198. Article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
50. Liu S.S., Zhang M., Zhao G.L., Wang X.H., Wang J.F. Microstructure and properties of ceramic particle reinforced FeCoNiCrMnTi high entropy alloy laser cladding coating // *Intermetallics*. 2022. Vol. 140. Article 107402. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107402>
51. Jiang X.J., Wang S.Z., Fu H., Chen G.Y., Ran Q.X., Wang S.Q., Han R.H. A novel high entropy alloy coating on Ti-6Al-4V substrate by laser cladding // *Materials Letters*. 2022. Vol. 308. Part B. Article 131131. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131131>
52. Deng C., Wang C., Chai L., Wang T., Luo J. Mechanical and chemical properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high entropy alloy coating fabricated on Ti-6Al-4V by laser cladding // *Intermetallics*. 2022. Vol. 144. Article 107504. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107504>
53. Bingyuan H., Shaoyi B., Wenbo D., Weixing H., Xue Y., Fangfang C., Jiajie C., Xianghan G., Sheng Z. Laser-irradiation-induced dynamically recrystallized microstructure and properties of supersonic-particle-deposited Ni-Fe-Cr-Nb-Ti-Al high-entropy alloy coating // *Materials Characterization*. 2022. Vol. 183. Article 111600. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111600>
54. 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. Vol. 153. P. 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.012>
55. Lindner T., Lobel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 371. P. 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
56. Erdogan A., Günen A., Gök M.S., Zeytin S. Microstructure and mechanical properties of borided CoCrFeNiAl_{0.25}Ti_{0.5} high entropy alloy produced by powder metallurgy // *Vacuum*. 2021. Vol. 183. Article 109820. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109820>
57. 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. Vol. 21. No. 3. P. 345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
58. Структура и свойства высокоэнтروпийных сплавов / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Шлярова, А.П. Семин. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. 230 с.
59. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam // *Journal Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
60. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam // *Metals*. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
61. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022. Т. 65. № 6. С. 427–433. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>
47. Zhang P., Xu Z., Yao Z., Liu Y., Lin S., He M., Lu S., Wu X. A high-corrosion-resistant high-entropy alloys (HEAs) coatings with single BCC solid solution structure by laser remelting. *Materials Letters*. 2022, vol. 324, article 132728. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132728>
48. Liu H., Li X., Liu J., Gao W., Du X., Hao J. Microstructural evolution and properties of dual-layer CoCrFeMnTi_{0.2} high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding. *Optics and Laser Technology*. 2021, vol. 134, article 106646. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106646>
49. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating. *Optik*. 2019, vol. 198, article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
50. Liu S.S., Zhang M., Zhao G.L., Wang X.H., Wang J.F. Microstructure and properties of ceramic particle reinforced FeCoNiCrMnTi high entropy alloy laser cladding coating. *Intermetallics*. 2022, vol. 140, article 107402. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107402>
51. Jiang X.J., Wang S.Z., Fu H., Chen G.Y., Ran Q.X., Wang S.Q., Han R.H. A novel high entropy alloy coating on Ti-6Al-4V substrate by laser cladding. *Materials Letters*. 2022, vol. 308, part B, article 131131. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131131>
52. Deng C., Wang C., Chai L., Wang T., Luo J. Mechanical and chemical properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high entropy alloy coating fabricated on Ti-6Al-4V by laser cladding. *Intermetallics*. 2022, vol. 144, article 107504. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107504>
53. Bingyuan H., Shaoyi B., Wenbo D., Weixing H., Xue Y., Fangfang C., Jiajie C., Xianghan G., Sheng Z. Laser-irradiation-induced dynamically recrystallized microstructure and properties of supersonic-particle-deposited Ni-Fe-Cr-Nb-Ti-Al high-entropy alloy coating. *Materials Characterization*. 2022, vol. 183, article 111600. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111600>
54. 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, vol. 153, pp. 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.012>
55. Lindner T., Lobel M., Sattler B., Lampke T. Surface hardening of FCC phase high-entropy alloy system by powder-pack boriding. *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 371, pp. 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.017>
56. Erdogan A., Günen A., Gök M.S., Zeytin S. Microstructure and mechanical properties of borided CoCrFeNiAl_{0.25}Ti_{0.5} high entropy alloy produced by powder metallurgy. *Vacuum*. 2021, vol. 183, article 109820. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109820>
57. 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, vol. 21, no. 3, pp. 345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
58. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Semin A.P. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2022, 230 p. (In Russ.).
59. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal Materials Research and Technology*. 2022, vol. 19, pp. 4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
60. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
61. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V., Panchenko I.A. Fractography of fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 427–433. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>

62. Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Воробьев С.В. Влияние электронно-пучковой обработки на характер разрушения высокоэнтропийного Cr-Mn-Fe-Co-Ni-сплава // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 5 (803). С. 35–39. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.5.35-39>
63. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Osintsev K.A. Effect of electron beam treatment on the structure and properties of Al-CoCrFeNi high-entropy alloy // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 22. P. 72–76. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2021.02.13>
64. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Кириллова А.В. Модифицирование структуры и свойств высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi импульсным электронным пучком // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2022. № 1. С. 65–76. https://doi.org/10.54826/19979258_2022_1_65
62. Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Vorob'ev S.V. Effect of electron beam treatment on the fracture behavior of high-entropy Cr-Mn-Fe-Co-Ni alloy. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022, no. 5 (803), pp. 35–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.5.35-39>
63. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kononov S.V., Osintsev K.A. Effect of electron beam treatment on the structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 22, pp. 72–76. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2021.02.13>
64. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Shlyarova Yu.A., Kononov S.V., Vorob'ev S.V., Kirillova A.V. Modification of structure and properties of high-entropy CrMnFeCoNi alloy by pulsed electron beam. *Problemy cherno metallurgii i materialovedeniya*. 2022, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.). https://doi.org/10.54826/19979258_2022_1_65

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Sergei V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-4809-8660
E-mail: ksv@ssau.ru

Олег Александрович Перегудов, к.т.н., помощник ректора по молодежной политике, Омский государственный технический университет
ORCID: 0000-0001-5154-5498
E-mail: olegomgtu@mail.ru

Oleg A. Peregudov, Cand. Sci. (Eng.), Rector's Assistant for Youth Policy, Omsk State Technical University
ORCID: 0000-0001-5154-5498
E-mail: olegomgtu@mail.ru

Михаил Олегович Ефимов, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-4890-3730
E-mail: moefimov@mail.ru

Mikhail O. Efimov, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-4890-3730
E-mail: moefimov@mail.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Yuliya A. Shlyarova, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5677-1427
E-mail: rubannikova96@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В. Е. Громов – концепция статьи, написание первого варианта статьи.

V. E. Gromov – formation of the article concept, writing the first version of the article.

С. В. Коновалов – анализ данных по модифицированию поверхности высокоэнтропийных сплавов различными видами обработки.

S. V. Kononov – analysis of data on the modification of the surface of high-entropy alloys by various types of processing.

О. А. Перегудов – анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных лазерному способу нанесения покрытий.

O. A. Peregudov – analysis of the works of domestic and foreign researchers devoted to the laser coating method.

М. О. Ефимов – анализ публикаций, посвященных магнетронному напылению высокоэнтропийных сплавов.

M. O. Efimov – analysis of publications devoted to magnetron sputtering of high-entropy alloys.

Ю. А. Шлярова – подбор и анализ обзорных статей и монографий, содержащих сведения о структуре, фазовом составе и свойств пленок и покрытий высокоэнтропийных сплавов на различные подложки.

Yu. A. Shlyarova – selection and analysis of review articles and monographs containing information on the structure, phase composition and properties of films and coatings of high-entropy alloys on various substrates.

Поступила в редакцию 30.08.2022

Received 30.08.2022

После доработки 09.09.2022

Revised 09.09.2022

Принята к публикации 09.09.2022

Accepted 09.09.2022