

Обзорная статья

УДК 621.793.71

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-115-130

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2025 г. В. К. Дробышев, С. В. Коновалов, И. А. Панченко

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

Аннотация. Представлены современные направления исследований высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), включая их фундаментальные аспекты, методы изготовления, упрочнения, а также области их применения. Проанализированы основные механизмы формирования микроструктуры и фазового состава ВЭС, подчеркивается центральная роль высокой конфигурационной энтропии в стабилизации однофазных твердорастворных структур и создании уникальных свойств, превосходящих традиционные сплавы. Систематизированы четыре основных направления исследований: термодинамическое обоснование фазообразования, микроструктурные трансформации, механические и функциональные свойства, а также разработка новых классов сплавов и легирующих концепций. Особое внимание уделено комплексному анализу различных методов производства ВЭС, начиная от традиционных плавочно-литейных технологий (вакуумная индукционная плавка, вакуумно-дуговой переплав, электрошлаковая плавка) и порошковых методов до современных инновационных аддитивных подходов (селективное лазерное сплавление, электроннолучевое плавление, лазерная наплавка). Показано, как различные технологии синтеза обеспечивают контроль над микроструктурой, размером зерен и фазовым распределением. Рассматриваются механизмы упрочнения ВЭС (твердо-растворное и осадочное упрочнение наночастицами), а также создание гетерогенных структур и упрочнение дефектами, что позволяет достигать оптимального сочетания прочности и пластичности. Обозначены основные области практического применения ВЭС — от аэрокосмической и энергетической промышленности до биомедицинского оборудования, защитных покрытий и каталитических применений. Подчеркивается растущее значение ВЭС в экстремальных условиях эксплуатации благодаря их термостабильности и коррозионной устойчивости. В заключительной части определены перспективные направления дальнейших исследований, включая развитие методов масштабирования производства, стандартизации материалов и использования вычислительных моделей для ускоренной разработки новых композиций. Подчеркивается необходимость междисциплинарного подхода, объединяющего передовые технологии производства с фундаментальными исследованиями, что открывает широкие перспективы для успешного внедрения ВЭС в высокотехнологичные сферы современной промышленности.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, микроструктура, осадочное упрочнение, электронная микроскопия, фазовый состав, механические свойства

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Дробышев В.К., Коновалов С.В., Панченко И.А. Исследование высокоэнтропийных сплавов и область их применения. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):115–130. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-115-130](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-115-130)

Review article

STUDY OF HIGH-ENTROPY ALLOYS AND THEIR APPLICATION FIELDS

© 2025 V. K. Drobyshev, S. V. Konovalov, I. A. Panchenko

Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Kirov str., 42)

Abstract. This paper presents a comprehensive overview of the current research directions in high-entropy alloys (HEAs), encompassing their fundamental aspects, processing routes, strengthening mechanisms, and application fields. The primary mechanisms governing the formation of the microstructure and phase composition in HEAs are analyzed, emphasizing the central role of high configurational entropy in stabilizing single-phase solid solutions and enabling the development of unique properties that surpass those of conventional alloys. The review systematically consolidates four primary research domains: the thermodynamic principles of phase formation, microstructural transformations, mechanical and functional properties, and the development of novel alloy classes and alloying strategies. Particular emphasis is placed on a comparative analysis of various HEA manufacturing methods, ranging from traditional melting and casting technologies—such as vacuum induction melting, vacuum arc remelting, and electroslag remelting—to powder metallurgy routes and modern innovative additive approaches, including selective laser melting, electron beam melting, and laser cladding. The study demonstrates how these diverse synthesis techniques enable control over microstructure, grain size, and phase distribution. The strengthening mechanisms of HEAs are examined, including solid-solution strengthening and precipitation hardening by nanoparticles, as well as the creation of heterogeneous structures and defect-mediated strengthening. These mechanisms are shown to be key to achieving an optimal balance of strength and ductility. The principal areas of practical HEA application are outlined, spanning the aerospace and energy industries to biomedical devices, protective coatings, and catalytic applications. The growing importance of HEAs for service under extreme conditions is highlighted, owing to their exceptional thermal stability and corrosion resistance. In conclusion, the review identifies promising avenues for future research, which include the development of scalable production methods, material standardization, and the implementation of computational models for the accelerated design of new compositions. The necessity of an interdisciplinary approach that integrates advanced manufacturing technologies with fundamental research is underscored, pointing towards broad prospects for the successful implementation of HEAs in high-tech sectors of modern industry.

Keywords: high-entropy alloys, microstructure, precipitation hardening, electron microscopy, phase composition, mechanical properties

Funding. The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Drobyshev V.K., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Study of high-entropy alloys and their application fields. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):115–130. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-115-130](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-115-130)

Введение

Высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) представляют собой инновационный класс материалов с многокомпонентным составом, включающим пять и более элементов в эквивалентных (равных) или близких концентрациях, что обеспечивает уникальные свойства, превосходящие традиционные сплавы [1]. За последние десятилетия ВЭС привлекли значительное внимание научного сообщества благодаря своему потенциалу для создания материалов с исключительным сочетанием механических, коррозионных и функциональных характеристик [2].

В настоящей работе проведен анализ современного состояния исследований ВЭС. Обзор охватывает фундаментальные направления ис-

следований, направленные на изучение фазообразования, микроструктуры и механических свойств ВЭС, с особым акцентом на огнеупорные сплавы и материалы с гетерогенной микроструктурой.

Рассмотрены методы изготовления ВЭС: от традиционных технологий (плавка и литье, механическое легирование) до современных инновационных подходов (аддитивные технологии). Особое внимание уделено анализу механизмов упрочнения, включая твердо-растворное упрочнение, создание гетерогенных микроструктур и упрочнение дефектами кристаллической структуры.

Проведен сравнительный анализ различных методов изготовления и упрочнения материалов с точки зрения их преимуществ, ограничений и целевых применений. Систематизированы области

применения ВЭС в аэрокосмической, энергетической, биомедицинской промышленности и защитных покрытиях. Современные исследования ВЭС направлены на расширение их практического применения через оптимизацию состава, совершенствование технологий производства, открывая новые возможности для создания материалов, работающих в экстремальных условиях.

Основные результаты

Исследования ВЭС объединяют четыре основных направления: термодинамическое обоснование фазообразования, микроструктурные трансформации, механические и функциональные свойства, а также разработку новых классов сплавов и легирующих концепций. Эти направления формируют основу для дальнейшего развития ВЭС как перспективных материалов для экстремальных и специализированных приложений.

Первое направление связано с изучением фазообразования и термодинамической стабилизации простых твердых растворов в многокомпонентных системах. Исследования показывают, что высокая конфигурационная энтропия смешения способствует формированию однофазных структур при $\Delta S_{mix} > 1,5R$, тогда как более низкая энтропия ведет к многофазным системам с интерметаллическими соединениями [2]. В работе [3] на примере огнеупорных высокоэнтروпийных сплавов исследуется относительный вклад энтропийных и энтальпийных факторов, а также электрохимического взаимодействия компонентов в формирование итогового фазового состава.

Второе направление посвящено исследованию микроструктуры и ее эволюции под воздействием термической обработки и деформации. Параметры охлаждения заготовки и последующей механической обработки определяют морфологию зерен и распределение вторичных фаз, что напрямую влияет на механические свойства сплавов [4; 5]. В работах [6; 7] используют атомно-зондовую томографию (АЗТ) для выявления локальных химических неоднородностей, влияющих на образование осадочных фаз (L_{12}) в высокоэнтропийных сплавах.

Третье направление охватывает механические и функциональные свойства. В работе [3; 8] систематизируют данные по прочностным характеристикам при высоких температурах и усталостным свойствам ВЭС, отмечая их превосходство над традиционными никелевыми сплавами. Использование ВЭС в металломатричных композициях демонстрирует высокую твердость и ста-

бильность микроструктуры. Изучение коррозионной стойкости и износостойкости ВЭС в агрессивных средах подтверждает их потенциал для защитных покрытий [9].

Четвертое направление связано с разработкой новых классов ВЭС и методов легирования. В работах [9 – 11] предлагают концепции легирования с привлечением алюминия и цирконием, а также варьирование содержания марганца и железа для улучшения баланса прочности и пластичности через создание твердо-растворных и дисперсионно-упрочняющих фаз. В работе [9] рассмотрено влияние изменения состава циркония и марганца на структуру, а также на механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrZrMnNi . Увеличение содержания циркония с 8 до 28 ат. % способствует формированию мелкозернистой структуры (размер зерна уменьшается с 30 до 5 мкм) и более однородному элементному распределению (рис. 1).

Оптимальными механическими характеристиками обладает сплав $\text{Co}_{19,8}\text{Cr}_{17,5}\text{Zr}_{15,3}\text{Mn}_{27,7}\text{Ni}_{19,7}$, демонстрирующий наибольшие нанотвердость (10 ГПа) и модуль Юнга (161 ГПа). Однако при увеличении нагрузки индентирования до 5 Н микротвердость этого сплава снижается по сравнению с материалом с более высоким содержанием циркония ($\text{Co}_{18,7}\text{Cr}_{16,5}\text{Zr}_{28,9}\text{Mn}_{17,4}\text{Ni}_{18,6}$), что указывает на более универсальные механические свойства сплавов с содержанием циркония около 20 – 30 ат. %. Результаты исследования подтверждают, что упрочняющее действие циркония обусловлено механизмом твердорастворного упрочнения.

В работах [10; 11] высокоэнтропийный сплав $\text{Al}_{2,1}\text{Co}_{0,3}\text{Cr}_{0,5}\text{FeNi}_{2,1}$, изготовленный методом проволоочной дуговой аддитивной печати, характеризуется дендритной микроструктурой с размерами зерен 4 – 15 мкм и разделением на дендритные и междендритные области. По данным электронной микроскопии дендриты обогащены алюминием и никелем, междендритные зоны – хромом и железом, а кобальт распределен равномерно (рис. 2).

Основными фазами являются кубический Al_3Ni и сферический $(\text{Ni},\text{Co})_3\text{Al}_4$, при этом вдоль границ субмикронных (40 – 100 нм) Al_3Ni фаз обнаружены дисперсные частицы $(\text{Ni},\text{Co})_3\text{Al}_4$ размером 7 – 10 нм. Такая микроструктура свидетельствует о реализации двух механизмов упрочнения (твердорастворного и дисперсионного), что позволяет прогнозировать высокие прочностные свойства сплава. (рис. 3).

В работе [11] показано, что сплав $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$, полученный вакуумно-

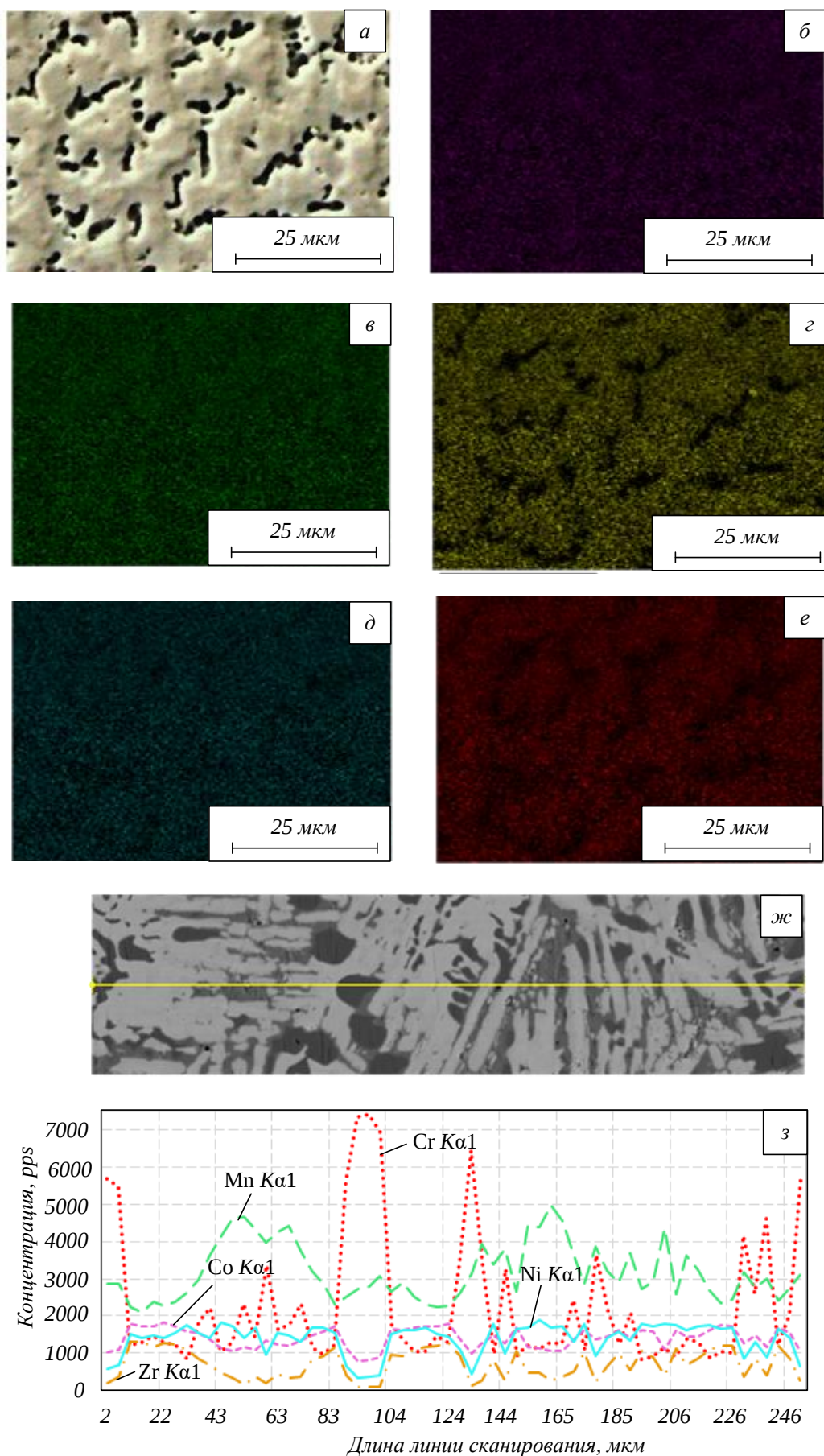


Рис. 1. Элементное картирование и определение концентрационной неоднородности сплава $\text{Co}_{18,7}\text{Cr}_{16,5}\text{Zr}_{28,9}\text{Mn}_{17,4}\text{Ni}_{18,6}$ вдоль линии протяженностью 246 μm [9]
 Fig. 1. Elemental mapping and determination of concentration heterogeneity of the $\text{Co}_{18,7}\text{Cr}_{16,5}\text{Zr}_{28,9}\text{Mn}_{17,4}\text{Ni}_{18,6}$ alloy along a line with a length of 246 μm [9]

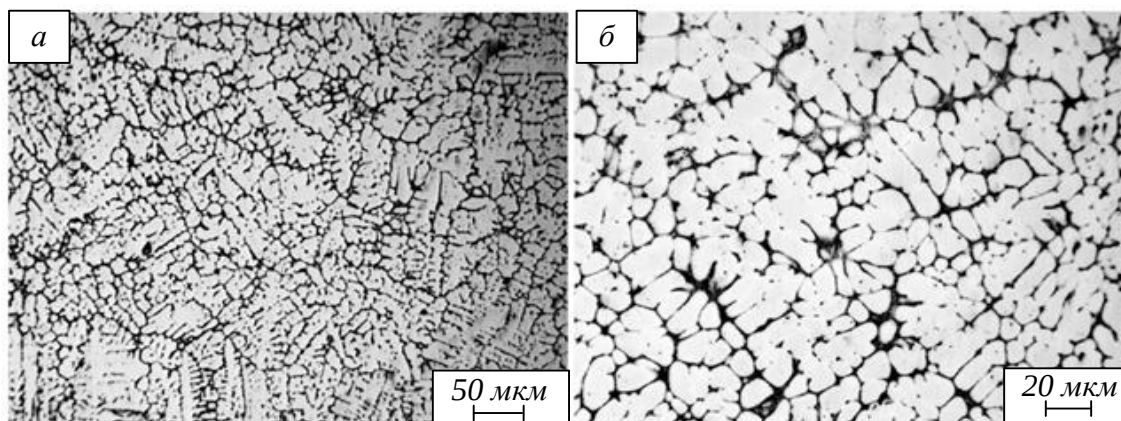


Рис. 2. Структура поперечного сечения высокоэнтропийного сплава (оптическая микроскопия протравленного микрошлифа)
Fig. 2. Cross-sectional structure of a high-entropy alloy (optical microscopy of an etched microsection)

индукционной плавкой, представляет собой однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой и дендритной микроструктурой третьего порядка, причем шары дендритных ветвей обогащены хромом, железом и кобальтом, а междендритные зоны – марганцем и никелем. Распределение элементов указывает на их частичную рекристаллизацию и осаждение вторичных фаз в интердендритных пространствах. Механические испытания продемонстрировали высокую (свыше 80 %) пластичность и предел текучести 236 МПа. Снижение содержания железа и увеличение марганца приводят к повышенной скорости натяжения и росту степени охрупчивания, а присутствие сферических включений, обогащенных марганцем и хромом, свидетельствует о влиянии неорганических фаз на механическое разрушение (рис. 4, табл. 1).

В работе [12] рассматривают перспективность гибридных композитов и керамических ВЭС для инженерных приложений, сочетающих механические свойства с функциональными возможностями (катализом, термической стойкостью). Чтобы обеспечить структурные особенности и упрочняющие механизмы высокоэнтропийных сплавов, применяются различные технологии синтеза: литье, порошковая металлургия, аддитивные и гибридные методы. Каждый из этих подходов позволяет управлять скоростью охлаждения, размером зерна и распределением фаз, формируя специфические свойства ВЭС.

Литье в постоянные и переплавные формы обеспечивает высокую производительность, но ограничивает контроль над скоростью охлаждения и, следовательно, над размером зерна и распределением фаз [13]. К основным технологиям получения высокоэнтропийных сплавов относятся вакуумная индукционная плавка, вакуумно-дуговой переплав и электрошлаковая плавка. Среди них процесс вакуумно-индукционной плавки (ВИП) позволяет

точно контролировать состав и чистоту сплавов, что имеет решающее значение для уникальных свойств ВЭС. Далее будут приведены ключевые преимущества метода ВИП при изготовлении высокоэнтропийных сплавов. Технология ВИП работает в условиях высокого вакуума, что значительно снижает загрязнение реактивными газами, это необходимо для производства чистых и бездефектных сплавов. Возможность испарения нескольких легирующих элементов и контролируемой их конденсации обеспечивает точный состав, что приводит к желаемым механическим и термическим свойствам материала. Вакуумно-индукционный переплав обеспечивает получение химически однородных слитков, что является преимуществом по сравнению с традиционными дуговыми методами, зачастую требующей многократных переплавов для достижения гомогенности состава. Процесс быстрого затвердевания, свойственный ВИП, способствует образованию фаз твердого раствора, в результате чего образуются отдельные микроструктуры, повышающие механическую прочность и коррозионную стойкость материала. Технология ВИП может работать с элементами с высокой температурой плавления, что делает его пригодным для сложных теплообменников, например, для высокотемпературных применений.

Наряду с литейными методами, для получения материалов также широко используются подходы порошковой металлургии. Механическое легирование исходных металлических и оксидных порошков в шаровых мельницах с последующим горячим изостатическим прессованием и спеканием позволяет формировать наноструктурированные ВЭС с тонкодисперсными упрочняющими фазами. В работах [14; 15] отмечено, что такой подход дает возможность вводить слабо-растворимые металлы и керамические частицы, обеспечивая твердо-растворное и

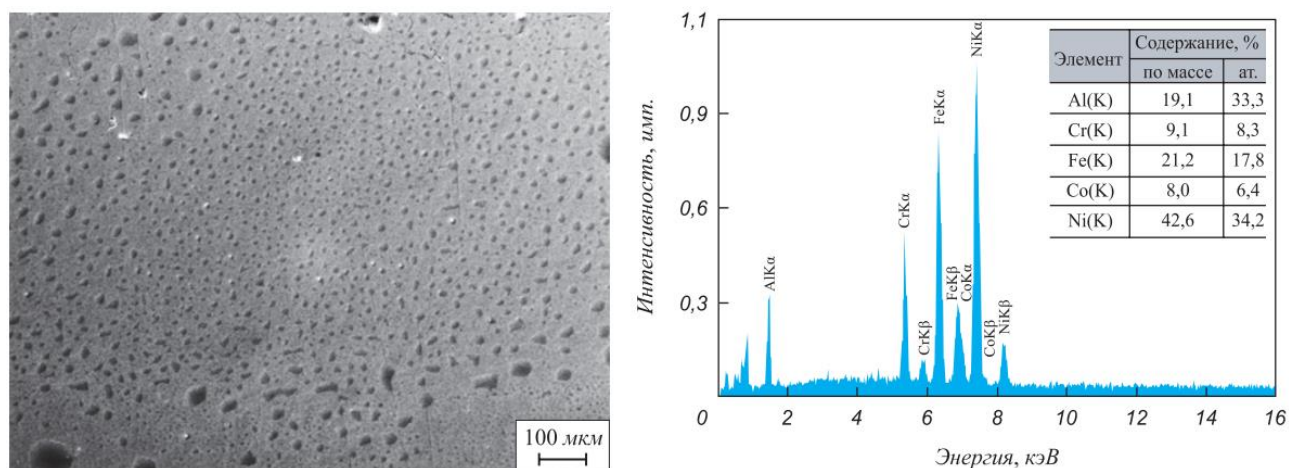


Рис. 3. Структура (а) и энергетические спектры (б) сплава системы FeCoCrNiAl
 Fig. 3. Structure (a) and energy spectra (b) of the FeCoCrNiAl system alloy

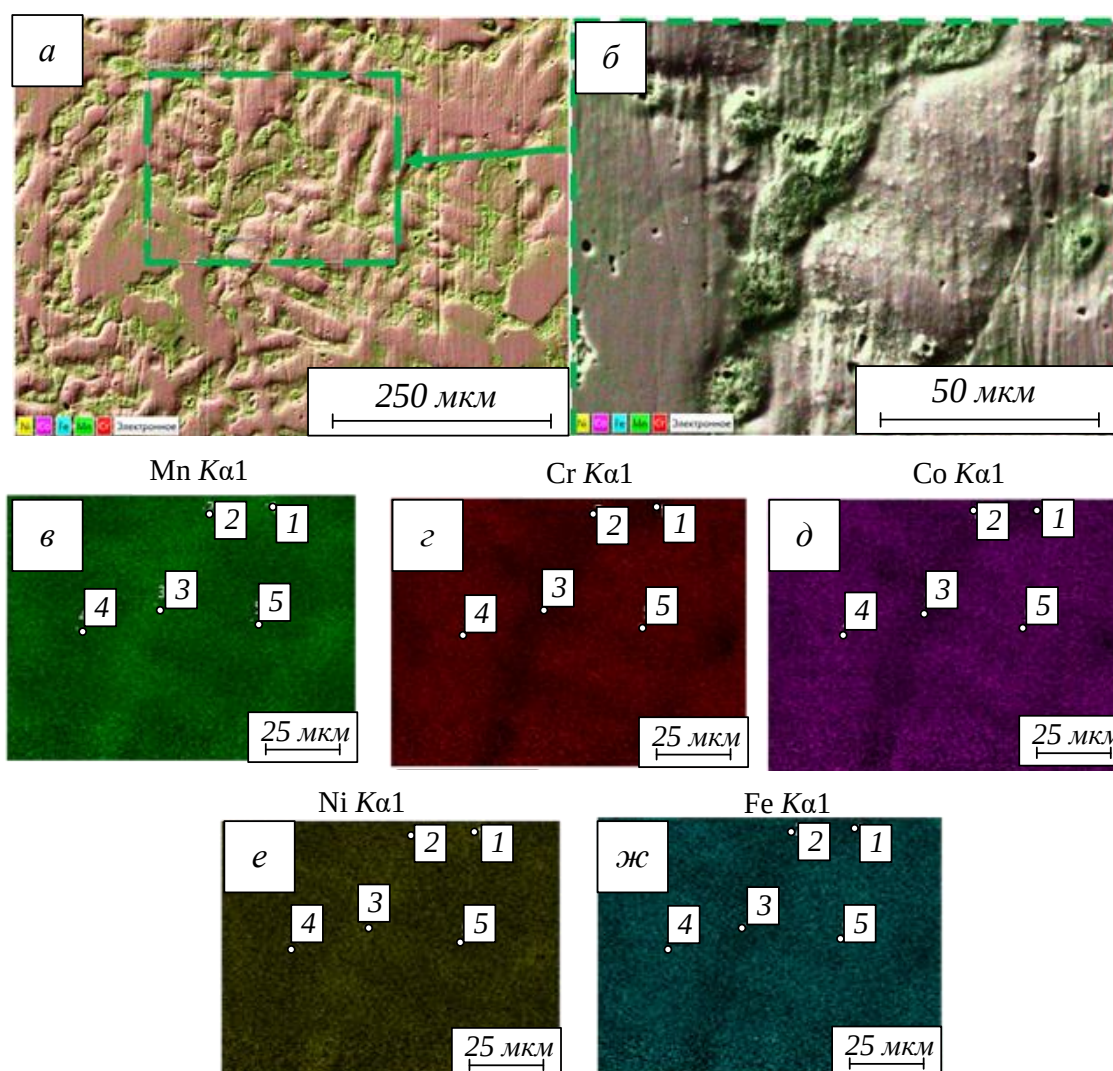


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности ВЭС и элементное картирование дендритной и междендритной области
 Fig. 4. Electron microscopic image of the surface structure of the HES and elemental mapping of the dendritic and interdendritic region

Результаты микрорентгеноспектрального анализа ВЭС
Table 1. Results of the micro-X-ray spectral analysis of the WES

Область	Содержание, атом. %, элемента				
	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Спектр 1 (междендритная область)	12,41	43,41	5,34	13,85	25,00
Спектр 2 (междендритная область)	16,28	37,92	7,65	17,69	20,47
Спектр 3 (междендритная область)	14,20	40,20	6,56	15,32	23,71
Спектр 4 (дендритная область)	21,74	28,59	11,12	21,32	17,24
Спектр 5 (дендритная область)	22,89	27,81	11,77	21,58	15,95
В среднем	16,16	37,53	7,67	17,05	21,06

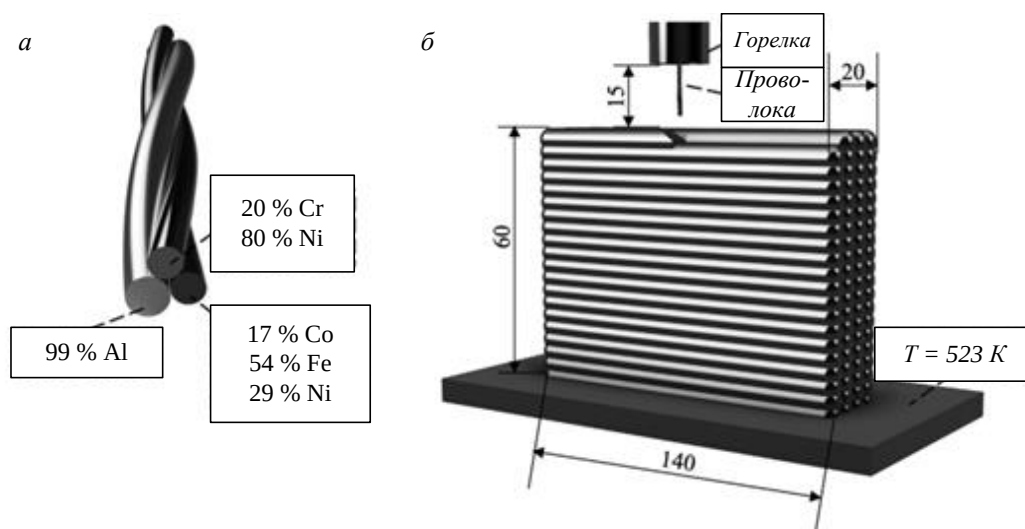


Рис. 5. Трехжильный кабель (а) и схема аддитивного производства с использованием дуговой проволоки (б)
 Fig. 5. Three-core cable used (a) and schematic of arc wire additive manufacturing (б)

осадочное упрочнение в одной матрице. Ключевым ограничением остается необходимость оптимизации давления, температуры спекания и времени выдержки для предотвращения чрезмерного роста зерна и ухудшения пластичности.

Современный этап изготовления ВЭС тесно связан с развитием аддитивных технологий (рис. 5) [16]. Селективное лазерное сплавление (СЛС), электроннолучевое плавление (ЕВМ) и лазерное напыление позволяют получать сложные геометрические формы с минимальным объемом отходов и высокой скоростью изготовления [16; 17]. В образцах системы CoCrFeNi, изготовленных методом СЛС, наблюдается сверхтонкая микроструктура с зернами порядка 100 – 200 нм, что приводит к высокому пределу текучести (более 800 МПа) и отличной пластичности (более 15 %). Отмечено, что высокие скорости охлаждения позволяют формировать метастабильные фазы и подавлять рост интерметаллидов, однако основными недостатками, связанными с этим процессом, являются остаточная пористость из-за неполного плавления порошка и возникновение

термических напряжений при послойном формировании.

Лазерная наплавка и плазменное напыление представляют отдельную категорию аддитивных покрытий. В работах [18; 19] описано использование лазерного напыления для формирования высокопрочных поверхностных слоев ВЭС на стальных подложках, что позволяет увеличить износостойкость в 2 – 3 раза по сравнению с традиционными никелевыми покрытиями. Проведено сравнение плазменно-дугового и плазменно-порошкового напыления, отмечены более высокая плотность и гладкость покрытия после плазменно-порошкового напыления, но при этом указана сложность контроля тепловложений и риска перегрева подложки [20; 21].

Гибридные методы синтеза ВЭС стремятся объединить преимущества традиционных и аддитивных технологий [22; 23]. Предложена схема механического легирования с последующим СЛС сплавлением порошковой заготовки. Заготовку подвергали лазерному плавлению, что сохраняло упрочняющие фазы и формировало однородную микроструктуру. В работах [24; 25]

комбинировали индукционную плавку с последующим порошковым спеканием, добиваясь тонкого контроля фазовых превращений и минимизации дефектов.

Эволюция методов изготовления ВЭС прошла путь от классических методов литья и порошкового производства до современных аддитивных и гибридных подходов. Использование многокомпонентного порошкового синтеза с лазерным и электроннолучевым сплавлением позволяет создавать сложные структурные материалы с оптимальными сочетаниями прочности, твердости и пластичности. Будущее направление развития связано с оптимизацией параметров аддитивного производства, внедрением вычислительных методов для предсказания свойств и разработкой энергоэффективных гибридных процессов, обеспечивающих промышленную конкурентоспособность ВЭС в промышленных отраслях. Выбор технологий синтеза и обработки (от литья и порошковых методов до аддитивных и гибридных подходов) создает микроструктуру с заданным размером зерна, распределением фаз и дефектным состоянием. Эти особенности напрямую определяют механизмы упрочнения ВЭС (от твердо-растворного до осадочного и градиентного), обеспечивая их выдающиеся прочностные и пластические характеристики.

Методы упрочнения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) базируются на управлении микроструктурными и фазовыми характеристиками, сформированными на этапе синтеза, и позволяют существенно повысить прочность без значительной потери пластичности. Основные механизмы упрочнения материалов включают твердорастворное, зернограничное, деформационное и дисперсионное упрочнение.

Высокая энтропия смешения в ВЭС приводит к значительным флуктуациям локального состава и сильным искажениям решетки, что препятствует движению дислокаций. Разработана теория упрочнения [26] на основе твердо-растворных эффектов, показывая, что энергия взаимодействия дислокаций с полями напряжений из-за искажений решетки, составляет основу высокой прочности ВЭС. Подтверждено, что степень искажения решетки напрямую коррелируется с различием атомных радиусов компонентов, и предложено оптимизировать соотношение легких и тяжелых элементов для максимального эффекта упрочнения [27].

Формирование осадочных фаз (L_{12} -структуры) тормозит движение дислокаций. Осадочное упрочнение за счет L_{12} -фазы в сплавах CoCrFeNi повышает предел текучести более чем на 30 % без значительного ухудшения пластичности [28]. Нанопреципитаты образуются при термической обработке в интервале температур

700 – 900 °C, создавая плотную сеть препятствий для дислокаций. При сравнении традиционных и аддитивных методов формирования осадочных фаз, отмечено более однородное распределение наночастиц при селективном лазерном сплавлении [29].

Создание градиентных или бимодальных структур позволяет сочетать высокую прочность мелкозернистых областей с пластичностью крупных зерен. В работе [30] разработали многослойные сплавы с градиентным размером зерна, демонстрируя увеличение сочетания прочности и пластичности на 20 % по сравнению с однородными структурами. В работе [31] применили лазерную наплавку для формирования градиента твердо-растворных и осадочных фаз по толщине покрытия, что обеспечило одновременное упрочнение поверхности и сохранение пластичности основы.

Быстрое охлаждение при аддитивном производстве и термической обработке создает высокую плотность дефектов (дислокаций, малоугловых искаженных границ зерен) [32]. В работе [33] для образцов системы CoCrFeNi, полученных методом СЛС, установлено, что увеличение механических свойств достигается за счет нескольких механизмов. Показана значительная роль зернограничного упрочнения (эффект Холла-Петча), а также выявлено, что контролируемые деформационные процессы в ходе спекания приводят к увеличению плотности дислокаций, что усиливает сопротивление пластической деформации.

Многомеханическое упрочнение, основанное на комбинации твердо-растворного, осадочного и градиентного подходов, является ключом к достижению оптимального баланса между прочностью и пластичностью [34]. Синергия нескольких механизмов упрочнения позволяет преодолевать классический компромисс прочность – пластичность. Современные гибридные методы синтеза (механическое легирование с последующим лазерным плавлением) демонстрируют эффективность одновременного формирования осадочных фаз и дефектного состояния для комплексного упрочнения [35]. Методы упрочнения ВЭС опираются на управление дислокационной и фазовой структурами через выбор соответствующих термических и механических режимов. Последовательное и комбинированное применение твердо-растворного, осадочного, градиентного и дефектного упрочнения открывает путь к созданию материалов с оптимальными механическими характеристиками [36].

Высокоэнтропийные сплавы применяются в реакторах и трубопроводах, эксплуатирующиеся в агрессивных средах кислот, щелочей и органических растворителей. Высокий уровень легирования

хромом, алюминием и титаном обеспечивает формирование защитных оксидных слоев, препятствующих коррозии и эрозии [37]. Защитные покрытия из ВЭС на основе Ni – Cr – Al обладают высокой пульсационной коррозионной стойкостью в морской воде, что продлевает срок службы корпусов и турбинных лопаток морских судов [38].

ВЭС перспективны для высоконагруженных компонентов двигателей и подвесок, где требуется сочетание ударной прочности и износостойкости. Легированные композиции на основе Al – Co – Cr – Fe демонстрируют улучшенные трибологические характеристики и стабильно высокую механическую прочность при эксплуатации в температурном диапазоне от –40 до +200 °C [39 – 41].

Некоторые ВЭС (на основе Ti – Zr – Nb – Mo) обладают низкой токсичностью и оптимальным модулем упругости, близким к костной ткани, что снижает эффект «полевого» перегрева и повышает остеоинтеграцию. Сплавы без никеля особенно перспективны для кардиостимуляторов и ортопедических имплантатов [42].

Методы напыления плазмой и лазером позволяют наносить ВЭС-покрытия толщиной до нескольких миллиметров на металлические подложки, значительно повышая износостойкость, коррозионную и термическую устойчивость поверхностных слоев. Такие покрытия успешно применяются в горнорудной и строительной технике [43].

ВЭС проявляют уникальные магнитные, электрические и каталитические свойства. Сплавы на основе Co – Fe – Ni показывают малое сопротивление магнитному намагничиванию, что важно для трансформаторов и датчиков. Катализаторы на базе ВЭС эффективны в реакциях выделения водорода и окисления углеводородов, заменяя дорогие благородные металлы [44; 45].

Благодаря сочетанию высокой прочности, термостойкости и коррозионной устойчивости ВЭС используются в компонентах ракетных двигателей, ядерных реакторов и теплообменников промышленного оборудования для агрессивных сред. Разрабатываются сплавы с программируемыми фазами для адаптивных структур, способных изменять свойства под нагрузкой или температурой [46; 47].

Высокоэнтропийные сплавы охватывают широкий спектр отраслей (от аэрокосмической и энергетической до биомедицинской и электронной) благодаря их уникальным механическим, коррозионным и функциональным характеристикам. Их применение продолжает расширяться по мере развития технологического синтеза, упрочнения и покрытия [48 – 50].

Обсуждение результатов

В результате комплексного анализа исследований по высокоэнтропийным сплавам выявлено

несколько ключевых направлений, которые формируют современную парадигму их изучения и развития. Центральным аспектом становится аддитивное производство, на которое приходится значительная доля работ последних лет. В работе [16] представлен обзор практических достижений и технологических ограничений при 3D-печати ВЭС: отмечена исключительная гибкость СЛС в управлении микроструктурой, но указана необходимость точного контроля параметров лазерного луча и режима охлаждения для предотвращения пористости и растрескивания. Работы [19; 22; 23] дополняют эту картину, рассматривая особенности порошков для лазерного сплавления, а также влияние размера и формы частиц на качество слоев и механические свойства готовых образцов. В области упрочнения ключевую роль играет легирование металлоидом кремнием. Добавление Si в систему CoCrFeNi-ВЭС повышает твердо-растворное и осадочное упрочнение за счет формирования сильных искажений решетки и стабильных L1₂-нанофаз, что обеспечивает рекордное сочетание прочности и пластичности [17]. В работе [18] продемонстрировано, что реализация TRIP-эффекта (пластичность, индуцированная превращением) в высокоэнтропийных системах обеспечивает дополнительный механизм пластической деформации, что способствует повышению их усталостной прочности.

Металломатричные композиты на основе ВЭС рассматриваются как перспективные материалы для экстремальных условий. В работе [8] анализируются методы интеграции ВЭС в алюминиевые и титановые матрицы для повышения твердости, усталостной прочности и теплостойкости композитов. Также рассматриваются ограничения такого подхода, связанные с несовместимостью коэффициентов термического расширения и образованием трещин на межфазной границе.

Легкие высокоэнтропийные сплавы становятся все более востребованными в аэрокосмических и автомобильных отраслях. Переход к Al- и Mg-богатым системам подчеркивает необходимость обеспечения оптимального соотношения прочности и пластичности путем регулирования фазового состава и параметров термической обработки [40]. В работе [31] показано, что тугоплавкие легкие сплавы требуют особых условий плавки и медленного охлаждения для предотвращения образования хрупких интерметаллидов.

ВЭС на основе вольфрама, ниобия и тантала привлекают внимание своей высокой термостабильностью. Повышение пластичности и снижение стоимости этих сплавов может быть достигнуто применением комбинированных методов

лития и порошковой металлургии, а также легирования кремнием и алюминием для обеспечения образования прочных оксидных защитных слоев.

Биомедицинское применение ВЭС активно развивается. Безникелевые Ti – Zr – Nb – Mo системы демонстрируют отличную биосовместимость и коррозионную устойчивость в биологических средах, а также требуют дальнейшего изучения в долгосрочных имплантационных испытаниях [42].

Дальнейшее исследование высокоэнтропийных сплавов направлено на междисциплинарное изучение материалов: сочетании аддитивных технологий, управляемых легированием и инновационными методами упрочнения, подкрепленное современными термодинамикой и моделированием. Объединение усилий теоретиков, экспериментаторов и инженеров позволит реализовать потенциал ВЭС в аэрокосмической, энергетической, биомедицинской и других высокотехнологичных отраслях (табл. 2).

Выводы

Анализ основных направлений исследований ВЭС демонстрирует их быстрое развитие от фундаментальных концепций к практическим применениям. Современные исследования охватывают

широкий спектр аспектов: от фазообразования и микроструктуры до функциональных свойств и новых классов материалов. Междисциплинарный характер исследований ВЭС способствует развитию новых теоретических подходов и экспериментальных методов.

Ключевые направления дальнейших исследований в данной области включают разработку методологий создания материалов с заранее заданным комплексом свойств, совершенствование экономически эффективных технологий их производства, а также расширение сфер применения в высокотехнологичных отраслях. Успешная коммерциализация ВЭС требует решения технологических вызовов, включая масштабирование производства, стандартизацию и снижение стоимости.

Современное состояние исследований ВЭС характеризуется переходом от изучения модельных систем к разработке практических материалов. Этот переход требует интеграции фундаментальных знаний с инженерными подходами и создания эффективных технологических решений для промышленного внедрения рассматриваемого класса инновационных материалов.

Т а б л и ц а 2

Сравнение методов изготовления и упрочнения высокоэнтропийных сплавов
Table 2. Comparison of methods of manufacturing and hardening of high-entropy alloys

Метод изготовления / упрочнения	Краткая характеристика	Преимущества	Применение
Плавка и литье	Классический способ, массовое производство	Простота, но ограниченная однородность	Структурные материалы
Механическое легирование	Получение наноструктур, порошков	Высокая дисперсность	Композиционные материалы
Аддитивные технологии	3D-печать, лазерное сплавление	Сложные формы	Медицина
Термальное напыление	Покрытия ВЭС	Улучшение поверхностных свойств	Защитные покрытия
Осадочное упрочнение (L1 ₂ -фаза)	Введение нанопреципитатов	Высокая прочность и пластичность	Высоконагруженные детали
Гетерогенная микроструктура	Бимодальные структуры	Баланс прочности и пластичности	Структурные материалы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ye Y., Wang Q., Lu J., Liu C., Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*. 2016;19(6):349–362. <https://doi.org/10.1016/J.MATOD.2015.11.026>
2. Krishna S., Noble N., Radhika N., Saleh B. A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;109(2022):583–606. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.039>
3. Kaushik N., Meena A., Mali H. High entropy alloy synthesis, characterisation, manufacturing & potential applications: a review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021;371(1):1–25. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2006223>
4. Nene S., Sinha S., Yadav D., Dutta A. Metallurgical aspects of high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;1005:175849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175849>
5. Zhuo L., Xie Y., Chen B. A review on recent progress of refractory high entropy alloys: from fundamental research to engineering applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;33:1097–1129. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.131>
6. Dewangan S., Mangish A., Kumar S., Sharma A., Ahn B., Kumar V. A review on High-Temperature Applicability: A milestone for high entropy alloys. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022;35: 101211. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101211>
7. Sohrabi M., Kalhor A., Mirzadeh H., Rodak K., Kim H. Tailoring the strengthening mechanisms of high-entropy alloys toward excellent strength-ductility synergy by metalloid silicon alloying: A review. *Progress in Materials Science*. 2024;144:101295. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101295>
8. Pandey V., Seetharam R., Chelladurai H. A comprehensive review: Discussed the effect of high-entropy alloys as reinforcement on metal matrix composite properties, fabrication techniques, and applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;1002:175095. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175095>
9. Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Ли Х. Структура и механические свойства высокоэнтروпийных сплавов системы CoCrZrMnNi , полученных вакуумно-индукционной плавкой, с разным содержанием Zr и Mn. *Frontier Materials & Technologies*. 2025;(1):21–34. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy FeCoCrNiAl alloy coating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(7):467–470. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>
11. Drobyshev V.K. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatomic alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(2):63–68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>
12. Kamal M., Ragunath S., Reddy M., Radhika N., Bassiouny S. Recent Advancements in Lightweight High Entropy Alloys- A Comprehensive Review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2024;7(5):699–720. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.06.001>
13. Xie X., Li N., Liu W., Huang S., He X., Yu Q., Xiong H., Wang E., Hou X. Research Progress of Refractory High Entropy Alloys: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35(142). <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00814-0>
14. Ragunath S., Radhika N., Saleh B. Advancements and future prospects of additive manufacturing in high-entropy alloy applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;997:174859. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174859>
15. Nair B., Supekar R., Javid M., Wang W., Zou Y., McDonald A., Mostaghimi J., Stoyanov P. High-Entropy Alloy Coatings Deposited by Thermal Spraying: A Review of Strengthening Mechanisms, Performance Assessments and Perspectives on Future Applications. *Metals*. 2023;13(3):579. <https://doi.org/10.3390/met13030579>
16. Osintsev K.A., Konovalov S.V., Gromov V.E. Research on the structure of $\text{Al}_{2.1}\text{Co}_{0.3}\text{Cr}_{0.5}\text{FeNi}_{2.1}$ high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels. *Materials Letters*. 2021;294:129717. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129717>
17. Moghaddam A., Shaburova N., Samodurova M., Abdollahzadeh A., Trofimov E. Additive manufacturing of high entropy alloys: A practical review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;77:131–162. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.029>
18. Mehranpour M., Sohrabi M., Jalali A., Kalhor A., Heydarinia A., Aghdam M., Mirzadeh H., Malekan M., Shahmir H., Rodak K., Kim H. Coupling different strengthening mechanisms

- with transformation-induced plasticity (TRIP) effect in advanced high-entropy alloys: a comprehensive review. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;926:147914.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147914>
19. Kumar A., Singh A., Suhane A. Mechanically alloyed high entropy alloys: Existing challenges and opportunities. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;17:2431–2456.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.141>
 20. Jarlöv A., Zhu Z., Ji W., Gao S., Hu Z., Vivegananthan P., Tian Y., Kripalani D., Fan H., Seet H., Han C., Tan L., Liu F., Nai M., Zhou K. Recent progress in high-entropy alloys for laser powder bed fusion: Design, processing, microstructure, and performance. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2024;161:100834.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100834>
 21. Adhikari J., Saha P., Mandal P., Sinha S., Seikh A., Mohammed J., Ghosh M. A Review on High Entropy Alloys as Metallic Biomaterials: Fabrication, Properties, Applications, Challenges, and Future Prospects. *Biomedical Materials & Devices*. 2025.
<https://doi.org/10.1007/s44174-025-00314-4>
 22. Castro D., Jaeger P., Baptista A., Oliveira J. An Overview of High-Entropy Alloys as Biomaterials. *Metals*. 2021;11(4):648.
<https://doi.org/10.3390/MET11040648>
 23. Li W., Xie D., Li D., Zhang Y., Gao Y., Liaw P. Mechanical behavior of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2021;118:100777
<https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2021.100777>
 24. Tang Y., Wang R., Xiao B., Zhang Z., Li S., Qiao J., Bai S., Zhang Y., Liaw P. A review on the dynamic-mechanical behaviors of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2023;135:101090.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101090>
 25. Zhu Z., Li Z., Liu Z., Gu C., Zhang Q., Wang L. Advanced Development of High-Entropy Alloys in Catalytic Applications. *Small methods*. 2025.
<https://doi.org/10.1002/smt.202500411>
 26. Ren J., Chen L., Wang H., Yuan Z. High-entropy alloys in electrocatalysis: from fundamentals to applications. *Chemical Society reviews*. 2023;52:8319–8373.
<https://doi.org/10.1039/d3cs00557g>
 27. Liu C., Wang Y., Zhang Y., Wang L. Additively Manufactured High-Entropy Alloys: Exceptional Mechanical Properties and Advanced Fabrication. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2024;37:3–16.
<https://doi.org/10.1007/s40195-023-01644-2>
 28. Zhang W., Chabok A., Kooi B., Pei Y. Additive manufactured high entropy alloys: A review on the microstructure and properties. *Materials & Design*. 2022;220:110875.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110875>
 29. Cagirici M., Guo S., Ding J., Ramamurty U., Wang P. Additive manufacturing of high-entropy alloys: Current status and challenges. *Smart Materials in Manufacturing*. 2024;2:100058
<https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100058>
 30. Torralba J., Campos M. High Entropy Alloys Manufactured by Additive Manufacturing. *Metals*. 2020;10(5):639.
<https://doi.org/10.3390/met10050639>
 31. Gürkan D., Dilibal S. High-entropy alloys in wire arc additive manufacturing: a review. *Advanced Manufacturing Research*. 2025.
<https://doi.org/10.21595/amr.2025.24828>
 32. Li J., Huang Y., Meng X., Xie Y. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21.
<https://doi.org/10.1002/adem.201900343>
 33. Arif Z., Khalid M., Rehman E., Ullah S., Atif M., Tariq A. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021; 68:225–273.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041>
 34. Shojaei Z., Khayati G., Darezereshki E. Review of electrodeposition methods for the preparation of high-entropy alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29:1683–1696.
<https://doi.org/10.1007/s12613-022-2439-y>
 35. Xiong W., Guo A., Zhan S., Liu C., Yeh J., Cao S. Refractory high-entropy alloys: A focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022;142:196–215.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.08.046>
 36. Soni V., Sinha A. Effect of Alloying Elements, Phases and Heat Treatments on Properties of High-Entropy Alloys: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022;76.
<https://doi.org/10.1007/s12666-022-02777-1>
 37. Xiao N., Guan X., Wang D., Yan H., Cai M., Jia N., Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Impact of W alloying on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of face-centered cubic high entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30:1667–1679.
<https://doi.org/10.1007/s12613-023-2641-6>

38. Anne B., Shaik S., Tanaka M., Basu A. A crucial review on recent updates of oxidation behavior in high entropy alloys. *SN Applied Sciences*. 2021;3(336).
<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04374-1>
39. Dada M., Popoola P., Mathe N. Recent advances of high entropy alloys for aerospace applications: a review. *World Journal of Engineering*. 2021;20(1):43–74.
<https://doi.org/10.1108/wje-01-2021-0040>
40. Pickering E., Carruthers A., Barron P., Middleburgh S., Armstrong D., Gandy A. High-Entropy Alloys for Advanced Nuclear Applications. *Entropy*. 2021;23(1):98.
<https://doi.org/10.3390/e23010098>
41. Lone N., Czerwinski F., Chen D. Present challenges in development of lightweight high entropy alloys: A review. *Applied Materials Today*. 2024;39:1022996.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102296>
42. Zhu D., Hu S., Fu Y., Zhao N., Liu D. A review of preparation methods, friction and wear, corrosion, and biocompatibility of biomedical high-entropy alloys. *Journal of Materials Science*. 2024; 59:1153–1183.
<https://doi.org/10.1007/s10853-023-09314-5>
43. De Oliveira T., Fagundes D., Capellato P., Sachs D., Da Silva A. A Review of Biomaterials Based on High-Entropy Alloys. *Metals*. 2022;12(11):1940.
<https://doi.org/10.3390/met12111940>
44. Arun S., Radhika N., Saleh B. Exploring the Potential of High Entropy Alloys: A Comprehensive Review on Microstructure, Properties, and Applications. *Johnson Matthey Technology Review*. 2023;68(4):549–566.
<https://doi.org/10.1595/205651324x17028969538851>
45. Cagirci M., Guo S., Ding J., Ramamurty U., Wang P. Additive manufacturing of high-entropy alloys: Current status and challenges. *Smart Materials in Manufacturing*. 2024;2:100058
<https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100058>
46. Torralba, J., Campos, M. High Entropy Alloys Manufactured by Additive Manufacturing. *Metals*. 10(5):639.
<https://doi.org/10.3390/met10050639>
47. Gürkan D., Dilibal S. High-entropy alloys in wire arc additive manufacturing: a review. *Advanced Manufacturing Research*. 2025.
<https://doi.org/10.21595/amr.2025.24828>
48. Li J., Huang Y., Meng X., Xie Y. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21(8):1900343.
<https://doi.org/10.1002/adem.201900343>
49. Xiao N., Guan X., Wang D., Yan H., Cai M., Jia N., Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Impact of W alloying on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of face-centered cubic high entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30:1667–1679.
<https://doi.org/10.1007/s12613-023-2641-6>
50. Miracle D.B. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*. 2017;5(1):1–19.

REFERENCES

1. Ye Y., Wang Q., Lu J., Liu C., Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects. *Materials Today*. 2016;19(6):349–362.
<https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2015.11.026>
2. Krishna S., Noble N., Radhika N., Saleh B. A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;109(2022):583–606.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.039>
3. Kaushik N., Meena A., Mali H. High entropy alloy synthesis, characterisation, manufacturing & potential applications: a review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021;371(1):1–25.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2006223>
4. Nene S., Sinha S., Yadav D., Dutta A. Metallurgical aspects of high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;1005:175849.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175849>
5. Zhuo L., Xie Y., Chen B. A review on recent progress of refractory high entropy alloys: from fundamental research to engineering applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;33:1097–1129.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.131>
6. Dewangan S., Mangish A., Kumar S., Sharma A., Ahn B., Kumar V. A review on High-Temperature Applicability: A milestone for high entropy alloys. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022;35: 101211.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101211>
7. Sohrabi M., Kalhor A., Mirzadeh H., Rodak K., Kim H. Tailoring the strengthening mechanisms of high-entropy alloys toward excellent strength-ductility synergy by metalloid silicon alloying: A review. *Progress in Materials Science*. 2024;144:101295.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101295>
8. Pandey V., Seetharam R., Chelladurai H. A comprehensive review: Discussed the effect of high-entropy alloys as reinforcement on metal

- matrix composite properties, fabrication techniques, and applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;1002:175095. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175095>
9. Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Li H. Structure and mechanical properties of high-entropy alloys of the coCrZrMnNi system obtained by vacuum induction melting with different Zr and Mn contents. *Frontier Materials & Technologies*. 2025;(1):21–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
 10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy FeCoCrNiAl alloy coating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022;65(7):467–470. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>
 11. Drobyshev V.K. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatom alloy of Co – Cr – Fe – Mn – Ni system. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(2):63–68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>
 12. Kamal M., Ragunath S., Reddy M., Radhika N., Bassiouny S. Recent Advancements in Lightweight High Entropy Alloys- A Comprehensive Review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2024;7(5):699–720. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.06.001>
 13. Xie X., Li N., Liu W., Huang S., He X., Yu Q., Xiong H., Wang E., Hou X. Research Progress of Refractory High Entropy Alloys: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022;35(142). <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00814-0>
 14. Ragunath S., Radhika N., Saleh B. Advancements and future prospects of additive manufacturing in high-entropy alloy applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;997:174859. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174859>
 15. Nair B., Supekar R., Javid M., Wang W., Zou Y., McDonald A., Mostaghimi J., Stoyanov P. High-Entropy Alloy Coatings Deposited by Thermal Spraying: A Review of Strengthening Mechanisms, Performance Assessments and Perspectives on Future Applications. *Metals*. 2023;13(3):579. <https://doi.org/10.3390/met13030579>
 16. Osintsev K.A., Konovalov S.V., Gromov V.E. Research on the structure of Al_{2.1}Co_{0.3}Cr_{0.5}FeNi_{2.1} high-entropy alloy at submicro- and nano-scale levels. *Materials Letters*. 2021;294:129717. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129717>
 17. Moghaddam A., Shaburova N., Samodurova M., Abdollahzadeh A., Trofimov E. Additive manufacturing of high entropy alloys: A practical review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;77:131–162. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.029>
 18. Mehranpour M., Sohrabi M., Jalali A., Kalhor A., Heydarinia A., Aghdam M., Mirzadeh H., Malekan M., Shahmir H., Rodak K., Kim H. Coupling different strengthening mechanisms with transformation-induced plasticity (TRIP) effect in advanced high-entropy alloys: a comprehensive review. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;926:147914. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147914>
 19. Kumar A., Singh A., Suhane A. Mechanically alloyed high entropy alloys: Existing challenges and opportunities. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;17:2431–2456. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.141>
 20. Jarlöv A., Zhu Z., Ji W., Gao S., Hu Z., Vivegananthan P., Tian Y., Kripalani D., Fan H., Seet H., Han C., Tan L., Liu F., Nai M., Zhou K. Recent progress in high-entropy alloys for laser powder bed fusion: Design, processing, microstructure, and performance. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2024;161:100834. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100834>
 21. Adhikari J., Saha P., Mandal P., Sinha S., Seikh A., Mohammed J., Ghosh M. A Review on High Entropy Alloys as Metallic Biomaterials: Fabrication, Properties, Applications, Challenges, and Future Prospects. *Biomedical Materials & Devices*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00314-4>
 22. Castro D., Jaeger P., Baptista, A., Oliveira, J. An Overview of High-Entropy Alloys as Biomaterials. *Metals*. 2021;11(4):648. <https://doi.org/10.3390/MET11040648>
 23. Li W., Xie D., Li D., Zhang Y., Gao Y., Liaw P. Mechanical behavior of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2021;118:100777. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2021.100777>
 24. Tang Y., Wang R., Xiao B., Zhang Z., Li S., Qiao J., Bai S., Zhang Y., Liaw P. A review on the dynamic-mechanical behaviors of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2023;135:101090. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101090>
 25. Zhu Z., Li Z., Liu Z., Gu C., Zhang Q., Wang L. Advanced Development of High-Entropy Alloys in Catalytic Applications. *Small methods*. 2025. <https://doi.org/10.1002/smt.202500411>

26. Ren J., Chen L., Wang H., Yuan Z. High-entropy alloys in electrocatalysis: from fundamentals to applications. *Chemical Society reviews*. 2023;52:8319–8373.
<https://doi.org/10.1039/d3cs00557g>
27. Liu C., Wang Y., Zhang Y., Wang L. Additively Manufactured High-Entropy Alloys: Exceptional Mechanical Properties and Advanced Fabrication. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2024;37:3–16.
<https://doi.org/10.1007/s40195-023-01644-2>
28. Zhang W., Chabok A., Kooi B., Pei Y. Additive manufactured high entropy alloys: A review on the microstructure and properties. *Materials & Design*. 2022;220:110875.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110875>
29. Cagirci M., Guo S., Ding J., Ramamurty U., Wang P. Additive manufacturing of high-entropy alloys: Current status and challenges. *Smart Materials in Manufacturing*. 2024;2:100058
<https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100058>
30. Torralba J., Campos M. High Entropy Alloys Manufactured by Additive Manufacturing. *Metals*. 2020;10(5):639.
<https://doi.org/10.3390/met10050639>
31. Gürkan D., Dilibal S. High-entropy alloys in wire arc additive manufacturing: a review. *Advanced Manufacturing Research*. 2025.
<https://doi.org/10.21595/amr.2025.24828>
32. Li J., Huang Y., Meng X., Xie Y. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21.
<https://doi.org/10.1002/adem.201900343>
33. Arif Z., Khalid M., Rehman E., Ullah S., Atif M., Tariq A. A review on laser cladding of high-entropy alloys, their recent trends and potential applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021; 68:225–273.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.041>
34. Shojaei Z., Khayati G., Darezereshki E. Review of electrodeposition methods for the preparation of high-entropy alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29:1683–1696.
<https://doi.org/10.1007/s12613-022-2439-y>
35. Xiong W., Guo A., Zhan S., Liu C., Yeh J., Cao S. Refractory high-entropy alloys: A focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022;142:196–215.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.08.046>
36. Soni V., Sinha A. Effect of Alloying Elements, Phases and Heat Treatments on Properties of High-Entropy Alloys: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022;76.
<https://doi.org/10.1007/s12666-022-02777-1>
37. Xiao N., Guan X., Wang D., Yan H., Cai M., Jia N., Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Impact of W alloying on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of face-centered cubic high entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30:1667–1679.
<https://doi.org/10.1007/s12613-023-2641-6>
38. Anne B., Shaik S., Tanaka M., Basu A. A crucial review on recent updates of oxidation behavior in high entropy alloys. *SN Applied Sciences*. 2021;3(336).
<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04374-1>
39. Dada M., Popoola P., Mathe N. Recent advances of high entropy alloys for aerospace applications: a review. *World Journal of Engineering*. 2021;20(1):43–74.
<https://doi.org/10.1108/wje-01-2021-0040>
40. Pickering E., Carruthers A., Barron P., Middleburgh S., Armstrong D., Gandy A. High-Entropy Alloys for Advanced Nuclear Applications. *Entropy*. 2021;23(1):98.
<https://doi.org/10.3390/e23010098>
41. Lone N., Czerwinski F., Chen D. Present challenges in development of lightweight high entropy alloys: A review. *Applied Materials Today*. 2024;39:1022996.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102296>
42. Zhu D., Hu S., Fu Y., Zhao N., Liu D. A review of preparation methods, friction and wear, corrosion, and biocompatibility of biomedical high-entropy alloys. *Journal of Materials Science*. 2024; 59:1153–1183.
<https://doi.org/10.1007/s10853-023-09314-5>
43. De Oliveira T., Fagundes D., Capellato P., Sachs D., Da Silva A. A Review of Biomaterials Based on High-Entropy Alloys. *Metals*. 2022;12(11):1940.
<https://doi.org/10.3390/met12111940>
44. Arun S., Radhika N., Saleh B. Exploring the Potential of High Entropy Alloys: A Comprehensive Review on Microstructure, Properties, and Applications. *Johnson Matthey Technology Review*. 2023;68(4):549–566.
<https://doi.org/10.1595/205651324x17028969538851>
45. Cagirci M., Guo S., Ding J., Ramamurty U., Wang P. Additive manufacturing of high-entropy alloys: Current status and challenges. *Smart Materials in Manufacturing*. 2024;2:100058
<https://doi.org/10.1016/j.smmf.2024.100058>
46. Torralba J., Campos M. High Entropy Alloys Manufactured by Additive Manufacturing. *Metals*. 10(5):639.

- <https://doi.org/10.3390/met10050639>
47. Gürkan D., Dilibal S. High-entropy alloys in wire arc additive manufacturing: a review. *Advanced Manufacturing Research*. 2025. <https://doi.org/10.21595/amr.2025.24828>
48. Li J., Huang Y., Meng X., Xie Y. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. *Advanced Engineering Materials*. 2019;21(8):1900343. <https://doi.org/10.1002/adem.201900343>
49. Xiao N., Guan X., Wang D., Yan H., Cai M., Jia N., Zhang Y., Esling C., Zhao X., Zuo L. Impact of W alloying on microstructure, mechanical property and corrosion resistance of face-centered cubic high entropy alloys: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30:1667–1679. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2641-6>
50. Miracle D.B. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*. 2017;5(1):1–19.

Сведения об авторах:

Владислав Константинович Дробышев, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: drobyshev_vk@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-1532-9226

SPIN-код: 9629-4064

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., заведующий научно-исследовательской лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Information about the authors

Vladislav K. Drobyshev, Researcher at the Research Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

Email: drobyshev_vk@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-1532-9226

SPIN-код: 9629-4064

Sergey V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., vice-rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Irina A. Panchenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: i.r.i.ss@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 26.05.2025

После доработки 31.07.2025

Принята к публикации 04.08.2025

Received 26.05.2025

Revised 31.07.2025

Accepted 04.08.2025