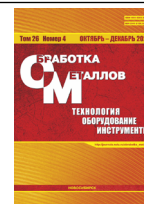




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Обзор исследований высокоэнтروпийных сплавов, их свойств, методов создания и применения

Анна Шуберт ^{a, *}, Сергей Коновалов ^b, Ирина Панченко ^c

Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-7355-2955>,  shubert-anna@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>,  kononov@sisu.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>,  i.r.i.ss@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71

История статьи:

Поступила: 21 апреля 2024

Рецензирование: 17 мая 2024

Принята к печати: 17 сентября 2024

Доступно онлайн: 15 декабря 2024

Ключевые слова:

Высокоэнтропийные сплавы

Износостойкость

Жаропрочность

Термоустойчивость

Пластичность

Усталостные свойства

Легирование

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются перспективы изучения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) – металлических материалов с уникальными свойствами. Изучение высокоэнтропийных сплавов актуально в связи с их свойствами, экологической устойчивостью, экономической выгодой и технологическим потенциалом. ВЭС представляют интерес для исследователей благодаря их стабильности, прочности, коррозионной стойкости и другим характеристикам, что делает их перспективными для использования в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, медицине и микроэлектронике. Таким образом, исследование ВЭС способствует развитию новых материалов и технологическому прогрессу, обеспечивая возможности для создания инновационных продуктов и совершенствования существующих решений. Для эффективного использования потенциала высокоэнтропийных сплавов требуются исследования в ряде направлений. Во-первых, необходимо улучшить технологию производства таких сплавов и разработать новые способы их получения с улучшенными характеристиками и сниженной стоимостью. Во-вторых, требуется установить основные принципы работы высокоэнтропийных сплавов и изучить механизмы, оказывающие влияние на их свойства. Следует также разработать новые сплавы с заданными свойствами, провести эксперименты и компьютерное моделирование для оптимизации характеристик сплавов и определения наилучших составов. **Цель работы:** обзор последних достижений в области высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), их свойств, методов создания и применения, а также определение наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований. **Методами исследования** являются обзор и анализ на основании разработок преимущественно 2020–2024 гг., которые были выполнены отечественными и зарубежными учеными. В статье обсуждаются перспективные исследования высокоэнтропийных сплавов – материалов, имеющих широкий спектр применения в различных отраслях промышленности. В работе приводятся результаты исследований, проведенных преимущественно в 2020–2024 гг. Описываются основные свойства высокоэнтропийных сплавов, такие как высокая прочность, коррозионная стойкость, усталостные свойства сплавов, пластичность и деформируемость, термоустойчивость, электропроводящие и магнитные свойства, а также возможность создания сплавов с заданными характеристиками. Выявлены самые распространенные методы изменения свойств сплавов. Рассматриваются направления дальнейшего развития исследований в этой области. **Результаты и обсуждение.** Обзор литературы показывает, что наиболее перспективным направлением для дальнейшего изучения можно считать электропроводящие и магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов. Это направление открывает значительные возможности для разработки новых энергосберегающих технологий, высокоэффективных сенсоров и магнитных материалов, что может привести к существенным инновациям в таких областях, как электроника, энергетика и информационные технологии. Исходя из проведенного анализа можно заключить, что высокоэнтропийные сплавы представляют собой перспективный класс материалов с широким спектром потенциальных применений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение границ знаний в области составов, методов и свойств ВЭС, а также на разработку новых материалов с улучшенными характеристиками, что откроет новые горизонты для инноваций в различных технологических секторах.

Для цитирования: Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Обзор исследований высокоэнтропийных сплавов, их свойств, методов создания и применения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 153–179. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179.

Введение

Изучение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) началось в относительно недавнее время, в начале XXI века. Их исследование связано с интересом к созданию новых материалов с не-

обычными свойствами и потенциалом для различных применений.

Высокоэнтропийные сплавы были предложены и исследованы в начале 2000-х годов группой ученых под руководством профессора Юнду Ли (Yeh J.W.) из Национального центра эксельсиорского университета Тайваня. Они опубликовали свои исследования в журналах в 2004 г. [1].

Высокоэнтропийные сплавы (High-Entropy Alloys, HEAs) представляют собой класс материалов, в которых пять или более различных

*Адрес для переписки

Шуберт Анна Владиславовна, аспирант

Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42,

654007, г. Новокузнецк, Россия

Тел.: +7 913 437-89-70, e-mail: shubert-anna@mail.ru

элементов смешиваются в равных или близких пропорциях [2]. Это открывает возможность формирования новых типов кристаллических структур и фаз, включая необычные кристаллические структуры, аморфные области и другие формы организации атомов, которые могут обладать уникальными свойствами. Современные исследования показывают, что в высокоэнтروпийных сплавах возможно образование структур и фаз, которые ранее не были обнаружены или не были хорошо изучены. Это расширяет традиционные представления о возможностях данного класса материалов.

Первые высокоэнтропийные сплавы были созданы путем плавления и смешивания элементов в соответствующих пропорциях, а затем охлаждения расплава до получения сплава. Это отличает их от традиционных сплавов, где обычно преобладает один или два основных элемента.

Высокоэнтропийные сплавы характеризуются высокой энтропией конфигурации атомов, обусловленной равномерным распределением пяти или более различных элементов в их структуре. Ранее считалось, что формирование однофазной структуры и равное присутствие элементов являются обязательными условиями, но современная концепция высокоэнтропийных сплавов продолжает эволюционировать. Введение элементов в равных пропорциях и формирование однофазной структуры больше не рассматривается как обязательное требование, что открывает новые перспективы и возможности для дальнейших исследований в этой области.

Сплавы могут обладать выдающимися механическими свойствами, такими как высокая прочность, твердость и устойчивость к износу. Это делает их полезными для создания легких, но прочных материалов для авиации, автомобилестроения и других отраслей. Некоторые ВЭС могут быть стойкими к агрессивным окружающим средам, что делает их подходящими для применения в условиях, где материалы должны сохранять свои свойства в течение длительного времени. Из-за своей составной природы ВЭС могут быть более доступными и экономически эффективными в производстве по сравнению с традиционными сплавами.

За последние десятилетия интерес к сплавам, разработанным на основе энтропийного подхода, заметно вырос, что объясняется перспективой ВЭС. За рубежом идея высокоэнтропийных сплавов была предложена в начале 2000-х гг., в России же исследования высокоэнтропийных сплавов начались чуть позже. Первые публикации и исследования российских ученых в этой области появились в конце 2000-х гг. и начале 2010-х гг. К 2010 г. российские исследователи уже активно занимались изучением ВЭС, публиковали статьи и участвовали в международных конференциях.

Исследователей особенно волнует потенциал открытия у металлов свойств, которые не присущи обычным материалам. Это может включать в себя новые формы магнитных или электрических свойств, суперпластичность, уникальную стабильность при высоких температурах и другие характеристики, которые не только преодолевают ограничения традиционных материалов, но и открывают двери для создания совершенно новых технологий и инновационных применений. Эти открытия могут стать ключом к разработке более эффективных и прогрессивных материалов, которые будут использоваться в широком спектре отраслей, от энергетики до медицины.

Однако следует отметить, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов все еще находятся на начальном этапе, и требуются дополнительное исследование и разработка, чтобы полностью раскрыть их потенциал и определить конкретные области применения.

Целью данной работы является обзор последних достижений в области высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), их свойств, методов создания и применения, а также определение наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований.

Задачи исследования:

- 1) осуществить обзор современных методов получения ВЭС;
- 2) исследовать влияние легирующих элементов на свойства ВЭС;
- 3) оценить свойства покрытий на основе ВЭС;
- 4) изучить коррозионную стойкость ВЭС;
- 5) изучить термостойкость ВЭС;
- 6) исследовать прочностные и пластические свойства ВЭС;

7) изучить электропроводящие и магнитные свойства ВЭС;

8) определить перспективные области применения ВЭС.

Методика исследований

В статье рассмотрены результаты обзора литературы, посвященной высокоэнтропийным сплавам. Исследование проведено на основании разработок преимущественно за 2020–2024 гг., которые были выполнены отечественными и зарубежными учеными. Изучены методы получения ВЭС с целью определения наиболее преобладающего. Учитывая высокий интерес ученых как к антикоррозийным свойствам сплавов в целом, так и к свойствам покрытий в частности, наибольшая часть обзора посвящена именно этому вопросу. В исследовании также приведены работы по улучшению термоустойчивости, прочности, пластичности, электропроводности и магнитных свойств высокоэнтропийных сплавов.

Исходя из анализа статистических данных, полученных из междисциплинарной бесплатной научной базы данных Scilit, которая индексирует научные материалы, можно отметить значительный рост публикаций и исследований по высокоэнтропийным сплавам за последние несколько лет. Это свидетельствует о повышенном

интересе к данной теме и делает текущий период наиболее актуальным для проведения анализа в этой области. Анализ данных был проведен на момент августа 2024 г.

Более подробная динамика количества публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» проиллюстрирована с помощью графика на рис. 1, отображающего количество публикаций в зависимости от года выпуска.

Из представленных статистических данных видно, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов переживают значительный рост за последние несколько лет. Начиная с 2004 г. количество публикаций по указанной теме постепенно увеличивалось, но наиболее заметный скачок произошел после 2015 г.

С 2015 по 2024 г. количество публикаций увеличилось более чем в 10 раз, что свидетельствует о растущем интересе к этой области исследований. Такой стремительный рост может быть обусловлен как расширением знаний в области высокоэнтропийных сплавов, так и повышенным вниманием к этой теме со стороны научного сообщества.

В настоящее время множество исследовательских групп по всему миру, включая США, Японию, Южную Корею, Китай и Европу, активно занимаются изучением высокоэнтропийных сплавов. Эти группы не только проводят фундаментальные исследования, но и разрабатывают

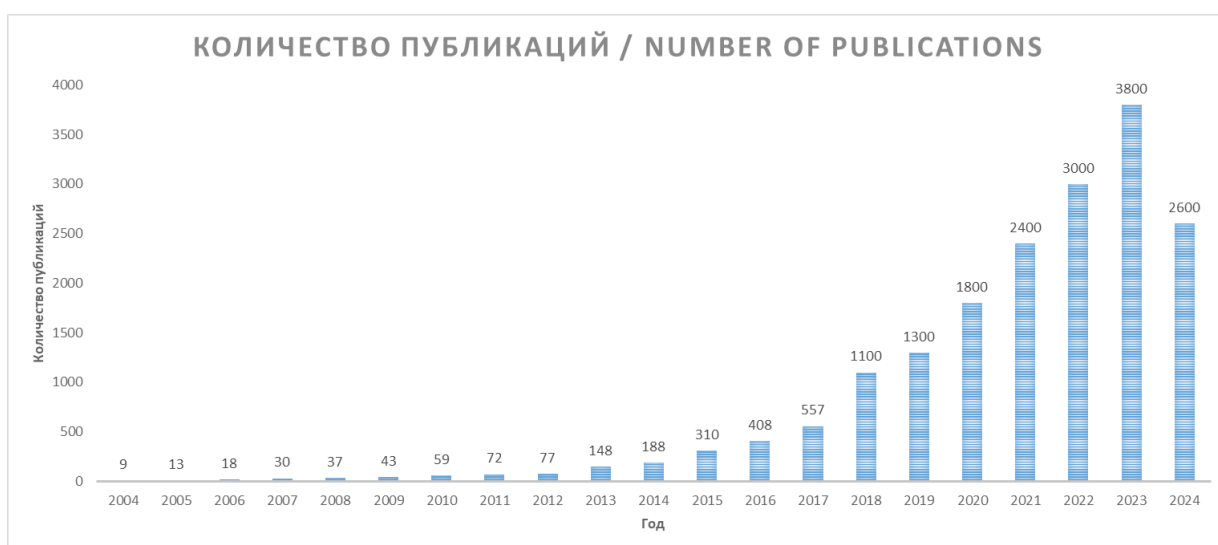


Рис. 1. Количество публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» в зависимости от года выпуска

Fig. 1. The number of publications on the topic “High-entropy alloys” depending on the year of publication

новые методы производства, улучшают свойства материалов и расширяют области их применения. Сотни ученых и инженеров по всему миру углубленно изучают эту область материаловедения.

На сегодняшний день около 100 стран принимают активное участие в разработке и изучении высокоэнтروпийных сплавов. Это свидетельствует о том, что данная область науки и техники привлекает внимание исследователей со всего мира, что способствует более глубокому пониманию и раскрытию потенциала рассматриваемых материалов. Для наглядной демонстрации географического разнообразия интереса к высокоэнтропийным сплавам на рис. 2 представлен список стран и количество публикаций, что позволяет оценить вклад каждой страны в эту область исследований.

Китай лидирует по количеству публикаций, значительно опережая остальные страны. США занимают второе место, однако их вклад существенно меньше. Далее следуют Индия, Германия и Япония, демонстрируя умеренную активность в этой области. Южная Корея и Россия

имеют сопоставимое количество публикаций. Великобритания, Франция и Австралия замыкают список. Приведенные данные указывают на высокую актуальность темы высокоэнтропийных сплавов в мировой научной среде с заметным лидерством Китая.

В настоящем обзоре приведены публикации из разных регионов, однако большая часть исследований выполнены на базе университетов и научных институтов Китая. Выбор исследований разработок зарубежных ученых, в частности из Китая, при изучении высокоэнтропийных сплавов за последние четыре года обусловлен несколькими факторами: Китай является одним из лидеров в области исследований и разработок высокоэнтропийных сплавов; в стране активно проводятся исследования в этой области, создаются новые сплавы и технологии их производства. Изучение зарубежных разработок позволяет оценить уровень развития науки в других странах, а также использовать их опыт и достижения для улучшения собственных исследований.

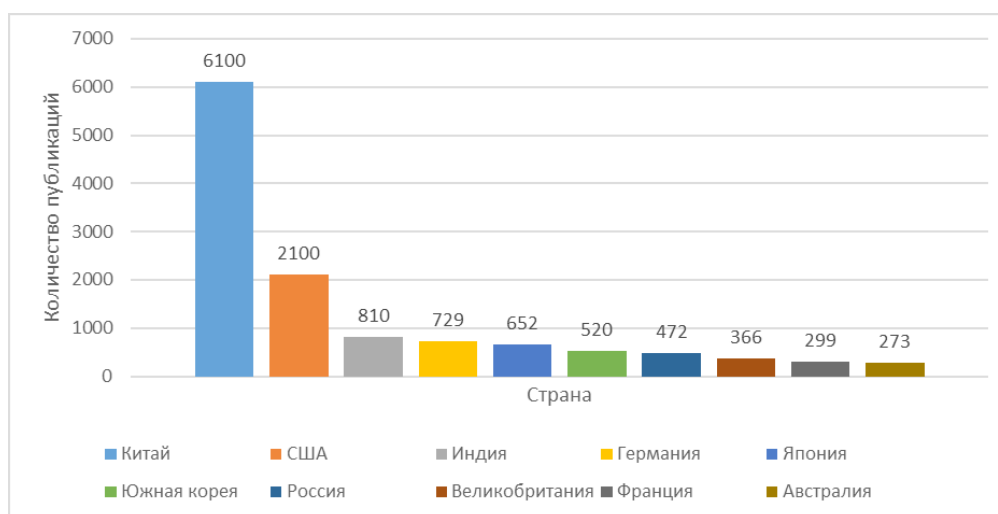


Рис. 2. Количество публикаций на тему «Высокоэнтропийные сплавы» в разных странах

Fig. 2. The number of publications on the topic “High-entropy alloys” in different regions

Результаты и их обсуждение

Методы получения высокоэнтропийных сплавов

Высокоэнтропийные сплавы можно получить несколькими способами. Могут быть использованы различные технические реше-

ния, связанные с процессами плавления, порошковой металлургии (механического легирования порошков), сварки, спиннингования, splat-охлаждения, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, магнетронного распыления мишеней, наплавки порошковых смесей на металлическую основу.

Самые первые ВЭС были получены в результате индукционной и дуговой плавки с последующим литьем [1, 2]. Этот процесс включал в себя плавление различных металлических компонентов сплава с использованием индукционной или дуговой печи, после чего расплавленный материал заливался в формы для создания желаемой формы и размера изделия.

Рогачев А.С. в своем исследовании [3] отмечает, что наиболее преобладающими методами получения ВЭС считают следующие:

- метод кристаллизации из расплавов;
- механическое сплавление в планетарных мельницах в сочетании с электроискровым плазменным спеканием;
- электроискровое плазменное спекание;
- синтез в режиме горения (СВС).

Помимо перечисленных методов, которые можно назвать классическими, в последние годы можно встретить и другие методы получения ВЭС.

Ученые State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials в своей работе рассмотрели все методы получения сплавов для покрытий и изучили свойства ВЭС. Ими было отмечено, что наиболее перспективным считается лазерно-аддитивный метод, который обладает высокой технологической точностью [4].

Метод лазерного аддитивного производства позволяет создавать сложные трехмерные структуры высокоэнтропийных сплавов прямо из порошков или проволоки. Лазерная плавка материала с высокой точностью и контролем параметров процесса позволяет получать сплавы с заданными микроструктурами и свойствами. В исследовании [5] был проведен обзор различных сплавов, полученных с помощью лазерного аддитивного производства. Отмечено, что данные сплавы отличаются быстрым проектированием и изготовлением, а также хорошими теплофизическими и механическими свойствами. В исследовании [6] был получен высокоэнтропийный сплав CrMnFeCoNi, обладающий выдающимися износостойкими и коррозионными свойствами, с помощью лазерного аддитивного производства и последующей лазерной ударной обработки. После лазерной обработки результаты показали значительное улучшение эксплуатационных свойств. В частности, коэффициент трения и скорость износа образцов значительно снизи-

лись. Например, высота царапин на поверхности необработанного образца колебалась от $-4,5$ до $4,2$ мкм, тогда как на образце, обработанном лазером с энергией 2 Дж, высота колебалась от $-4,2$ до $5,6$ мкм. При увеличении энергии лазера до 4 и 6 Дж на обработанных поверхностях наблюдались значительная колебательная рябь и более выраженные изменения микроструктуры.

Результаты испытаний на коррозию показали, что обработанные лазером образцы имели более низкую плотность коррозионного тока и более высокий коррозионный потенциал по сравнению с необработанными образцами, что указывает на улучшение коррозионной стойкости. В частности, у обработанных образцов наблюдалось снижение коррозионного тока до $0,1$ мкА/см² и повышение коррозионного потенциала до $-0,3$ В, что свидетельствует о формировании более плотных пассивных пленок, способных защитить материал от агрессивных ионов.

Основные выводы работы заключаются в том, что лазерное ударное упрочнение приводит к образованию слоя с повышенной микротвердостью и сжатием остаточного напряжения, который в свою очередь уменьшает износ и защищает материал от коррозии. Эти улучшения обусловлены утонением зерен и созданием остаточных напряжений сжатия, что способствует формированию более стойких пассивных пленок.

В недавнем исследовании, проведенном в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», обсуждается инновационный метод дуговой наплавки с использованием порошковой проволоки, который предлагает новый подход к изготовлению высокоэнтропийных сплавов. Метод включает в себя использование специально разработанных порошковых проволок и высококремнистого марганцевого флюса для наплавки; это позволяет избежать проблем, связанных с традиционными порошковыми методами. Исследование показало, что полученный металл состоит в основном из железа и легирующих элементов. Однако выявлены определенные проблемы, такие как наличие неметаллических включений и сравнительно низкая твердость по сравнению с эквивалентными высокоэнтропийными сплавами. Полученные результаты подчеркивают как потенциал, так и ограничения нового метода,

открывая перспективы для дальнейших исследований и улучшений в области высокоэнтропийных сплавов и их применения [7].

Легирование высокоэнтропийных сплавов

Одним из наиболее перспективных методов улучшения свойств ВЭС является легирование – процесс добавления различных элементов в основной состав сплава. Легирование открывает новые возможности для адаптации ВЭС под специфические требования различных отраслей промышленности.

Авторами будут рассмотрены различные свойства ВЭС, измененные методом легирования.

Легирование может оказывать значительное влияние на коррозионную стойкость высокоэнтропийных сплавов. Различные легирующие элементы могут по-разному взаимодействовать с окружающей средой и вызывать различные типы коррозии. В исследовании [8] было изучено влияние элемента Мо на микроструктуру, коррозионные свойства и состав пассивной пленки литого $\text{AlCrFeNi}_3\text{Mo}_x$, где $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Сплав $\text{Mo}_{0,3}$ имеет скорость коррозии 0,0155 мм/год и обладает превосходной коррозионной стойкостью по сравнению со сплавом Mo_0 . Повышенная коррозионная стойкость обусловлена превосходными защитными свойствами пассивной пленки с повышенным содержанием Cr_2O_3 и оксидов Мо, встроенных в пассивную пленку. В исследовании [10] было обнаружено, что добавление соответствующего количества Со для замены Сг в сплаве $\text{Fe}_{35}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}$ положительно влияет на коррозионную стойкость сплава.

Повышения износостойкости достигают за счет легирования бором [10], ниобием [11], карбидом вольфрама [12]. Легирование бором (0,3 ат. %) изменяет микроструктуру и механизм деформации сплава, что приводит к 35-кратному увеличению износостойкости. Основным механизмом улучшения связан с формированием наноструктурированных слоев и изменением типа износа под воздействием высоких нагрузок. Исследование показало, что добавление ниобия изменяет микроструктуру сплава, значительно повышает твердость и износостойкость покрытий, но снижает их коррозионную стойкость. Максимальная износостойкость наблюдалась при содержании ниобия 1,5 мол. %, при этом коэффициент износа снизился до 84 % при нагрузках 10

и 20 Н по сравнению с исходным сплавом без ниобия. Добавление 5–20 % карбида вольфрама (WC) в высокоэнтропийный сплав CrFeCoNi значительно улучшает его механические свойства. Твердость сплава увеличивается, улучшаются коррозионная стойкость и сопротивляемость износу. Особенно эффективным оказалось добавление 20 % WC, что привело к значительному повышению общей коррозионной стойкости и снижению износа примерно в 4,5 раза.

Для более наглядного сравнения результаты исследований занесены в табл. 1, где приведены данные о скорости износа различных высокоэнтропийных сплавов до и после легирования. Эти данные позволяют оценить эффективность легирования в улучшении износостойкости ВЭС.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что легирование значительно улучшает износостойкость высокоэнтропийных сплавов. Например, для сплава CoCrFeNi легирование бором (В) снизило скорость износа с $2,6 \cdot 10^{-5}$ до $8,3 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 2 Н. Аналогично добавление ниобия (Nb) в сплав $\text{AlCr}_2\text{FeCoNi}$ значительно уменьшило скорость износа – с $18,7 \cdot 10^{-6}$ до $5,2 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 5 Н. Введение вольфрама (W) в сплав CrFeCoNi также показало значительное снижение скорости износа – с $1,7 \cdot 10^{-4}$ до $3,8 \cdot 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ при нагрузке 5 Н. Эти результаты подтверждают, что легирование является эффективным методом повышения износостойкости высокоэнтропийных сплавов, и это делает их более пригодными для применения в условиях высоких нагрузок и интенсивного износа.

Легирование высокоэнтропийных сплавов элементами Nb [13], La [14], Y [15] существенно улучшает их температурную стойкость за счет изменения микроструктуры и химического состава. Указанные элементы способствуют формированию термодинамически стабильных фаз и защитных оксидных пленок, которые препятствуют росту зерен, уменьшают диффузионную подвижность атомов и защищают материал от окисления и коррозии. В результате ВЭС становятся более устойчивыми к высоким температурам и агрессивным условиям эксплуатации, что расширяет их применение в различных высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, энергетическая и автомобильная.

Скорость износа высокоэнтروпийных сплавов до и после легирования
Wear rate of high-entropy alloys before and after alloying

Высокоэнтропийный сплав / High entropy alloy	Металл для легирования / Metal for alloying	Характеристики до легирования / Characteristics before alloying		Характеристики после легирования / Characteristics after alloying	
		Нагрузка, Н / Load, N	Скорость износа, мм ³ /(Н·м) / Wear rate, mm ³ /(N·m)	Нагрузка, Н / Load, N	Скорость износа, мм ³ /(Н·м) / Wear rate, mm ³ /(N·m)
CoCrFeNi [10]	В	2	$2,6 \cdot 10^{-5}$	2	$8,3 \cdot 10^{-6}$
		5	$2,9 \cdot 10^{-5}$	5	$8,6 \cdot 10^{-5}$
		8	$3,57 \cdot 10^{-4}$	8	$8,9 \cdot 10^{-5}$
AlCr ₂ FeCoNi [11]	Nb	5	$18,7 \cdot 10^{-6}$	5	$5,2 \cdot 10^{-6}$
		10	$46,8 \cdot 10^{-6}$	10	$6,5 \cdot 10^{-6}$
		20	$40 \cdot 10^{-6}$	20	$6,2 \cdot 10^{-6}$
CrFeCoNi [12]	W	5	$1,7 \cdot 10^{-4}$	5	$3,8 \cdot 10^{-5}$

Исследование температурной зависимости механических свойств сплавов $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}$, $\text{Co}_{19}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}\text{C}_1$ и $\text{Co}_{17}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}\text{C}_3$ в диапазоне от 77 до 473 К, проведенное учеными из Томска [16], выявило, что легирование углеродом значительно влияет на их структурные и механические характеристики. Легирование приводит к увеличению параметра кристаллической решетки аустенитной фазы, повышению предела текучести и усилению температурной зависимости прочности за счет твердорастворного, зернограничного и дисперсионного упрочнения, особенно в гетерофазном сплаве $\text{Co}_{17}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Ni}_{20}\text{C}_3$. При этом если однофазные сплавы демонстрируют улучшение механических свойств и пластичности при низких температурах, то гетерофазный сплав становится более хрупким, несмотря на увеличение прочности.

Легирование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) такими элементами, как титан (Ti) [17], алюминий (Al) [18] и неодим (Nd) [19], играет ключевую роль в улучшении их прочностных свойств. Титан способствует повышению твердости и устойчивости к деформации, алюминий улучшает термоустойчивость и коррозионную стойкость, а добавление неодима способствует улучшению механических характеристик – проч-

ности и пластичности. Эти улучшения делают ВЭС более эффективными для использования в высоконагруженных и критически важных областях, таких как аэрокосмическая, автомобильная и энергетическая промышленность.

Добавление элементов С и Мо [20] в сплав способствует улучшению его пластичности. Углерод и молибден могут использоваться для микролегирования сплава, способствуя формированию мелких карбидных фаз в структуре материала. Эти карбиды могут действовать как преграды для движения дислокаций, что улучшает пластичность сплава. Водород также может быть использован для улучшения пластичности сплава путем снижения сопротивления пластическому деформированию [21, 22]. Растворенный водород способен изменять энергию образования дефектов в материале, что, в свою очередь, может повысить его способность к пластической деформации.

Легирование Zn [23] и Cu [24] играет ключевую роль в изменении электропроводящих характеристик высокоэнтропийных сплавов. Это открывает потенциал для развития энергосберегающих технологий, электрических проводников, сенсоров и элементов электроники. Изменение электропроводящих свойств зависит от состава сплава, температуры, давления

и наличия примесей, что подчеркивает важность легирования в процессе модификации этих материалов.

Были также исследованы усталостные характеристики тонких пленок из высокоэнтروпийного сплава $Al_{0,5}CoCrFeNi$ с различным добавлением алюминия. Результаты показывают, что добавление алюминия может эффективно уменьшить локализацию циклических деформаций и улучшить сопротивление усталости, что связано с уменьшением необратимости циклического скольжения [25]. В исследовании [26] также отмечено, что с добавлением Al к покрытию $FeCoNiTiAl_x$ повышается твердость покрытия и оно проявляет лучшую износостойкость.

Легирование играет важную роль в изменении различных свойств высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Такие элементы, как молибден, кобальт, бор, ниобий, карбид вольфрама, титан, алюминий, неодим, углерод, медь и цинк, используются для улучшения коррозионной стойкости, износостойкости, температурной стойкости, прочностных и пластичностных характеристик, а также электропроводящих свойств высокоэнтропийных сплавов (рис. 3).

Таким образом, легирование представляет собой мощный инструмент для модификации высокоэнтропийных сплавов с целью достижения определенных желаемых свойств и расширения их области применения.

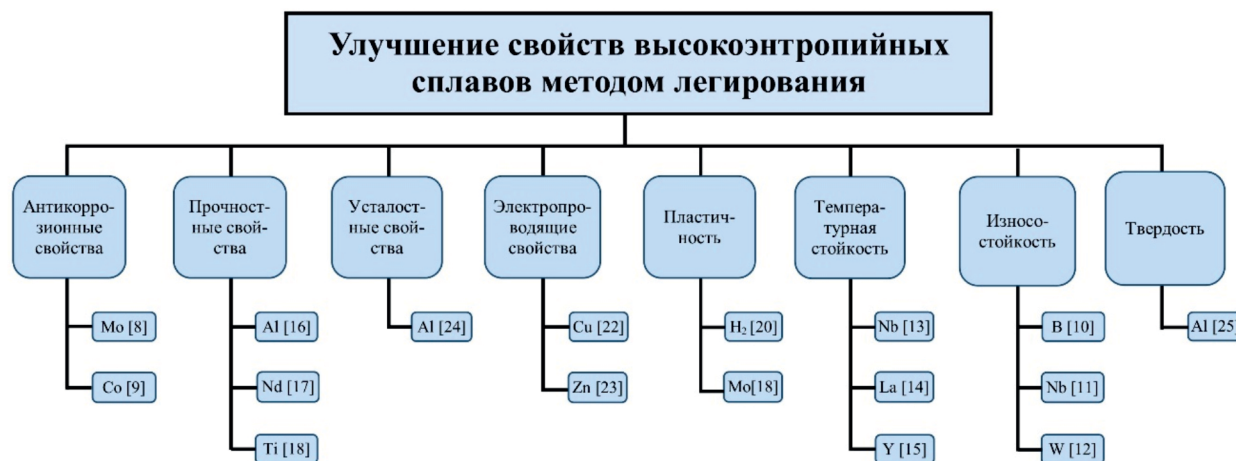


Рис. 3. Улучшение свойств высокоэнтропийных сплавов методом легирования

Fig. 3. Improving the properties of high-entropy alloys by alloying

Покрывтия и их свойства

Методы получения покрытий из ВЭС

При изучении материалов, опубликованных как в российских, так и в зарубежных источниках за последние несколько лет, становится очевидным интерес ученых к получению тонких пленок и покрытий ВЭС. Этот вывод также подтверждает исследование [27], в котором отмечен существенный рост исследований пленок и покрытий высокоэнтропийных сплавов и модифицирование поверхности различными методами в последние пятилетие.

Покрывтия на основе ВЭС в настоящее время представляют большой исследовательский интерес в материаловедении благодаря своей композиционной свободе и выдающимся свойствам,

таким как превосходная твердость и ударная вязкость, высокая стойкость к износу, коррозии и окислению, а также исключительная термическая стабильность [28].

Методы нанесения покрытий из высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) играют ключевую роль в определении их окончательных свойств и областей применения. Выбор технологии нанесения покрытия напрямую влияет на микроструктуру, фазовый состав, адгезию к подложке, а также на механические и функциональные характеристики покрытия. В последние годы наблюдается значительный интерес к разработке и усовершенствованию различных методов нанесения покрытий из ВЭС, что обусловлено их уникальными свойствами – высокой твердостью, стойкостью к износу и коррозии,

термической стабильностью и механической прочностью.

Основные методы нанесения покрытий из ВЭС: лазерная наплавка, магнетронное распыление, процессы нитридирования и окисления подложек. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и особенностями, которые делают их подходящими для различных применений и условий эксплуатации.

Покрытия из высокоэнтروпийного сплава FeNiCoAlCu, полученные методом лазерной наплавки, демонстрируют высокую износостойкость. Результаты исследований показали, что такие покрытия обладают хорошей термической стабильностью при температурах ниже 780 °C. Отмечается также, что они демонстрируют хорошие характеристики износа при высоких температурах, в основном это связано с образованием оксидных пленок на поверхности покрытия. В механизмах износа преобладают абразивный и окислительный износ [29].

Высокоэнтропийные керамические пленки, полученные путем нитридирования или окисления подложек из высокоэнтропийных сплавов, обладают хорошими противоиносными, антирадиационными, антикоррозионными и антиокислительными характеристиками. Перечисленные свойства делают их привлекательными для применения в экстремальных условиях, где нужны высокая температура, высокая прочность и сильное излучение [30].

Магнетронное распыление позволяет получать пленки высокоэнтропийных сплавов с улучшенными свойствами. Например, пленка FeCoNiCuAl, полученная этим методом, демонстрирует улучшенные коррозионные и магнитные свойства по сравнению с объемным сплавом аналогичного состава. Исследования показывают, что такие пленки обладают лучшей коррозионной стойкостью, чем их объемные аналоги [31].

Свойства покрытий из ВЭС

Исследованы коррозионная стойкость, магнитные свойства и микроструктура наплавленных и отожженных пленок. Результаты показывают, что наплавленный ВЭС имеет лучшую коррозионную стойкость, чем объемный высокоэнтропийный сплав с тем же составом. Наиболее актуальные и заметные разработки в области антикоррозионных свойств покрытий

рассмотрены международными специалистами в работе [32].

В исследовании, проведенном авторами [33], были изучены высокоэнтропийные покрытия на основе состава FeCoCrNiMoTiW, изготовленные методом механического легирования. Результаты исследования показали, что твердость этих покрытий превышает твердость большинства нержавеющей сталей в 1,5...2 раза, а коэффициенты сухого трения лежат в области 0,08...0,16. Это значительное различие в коэффициентах трения высокоэнтропийных покрытий обусловлено их наноструктурной особенностью и проявлением у них размерной зависимости свойств. Таким образом, исследование продемонстрировало потенциал этих покрытий в области механических свойств.

В исследовании [34] провели сравнение между покрытием из высокоэнтропийного сплава и образцами стали. Учеными отмечено, что наноструктурное покрытие FeCrNiTiZrAl обладает значительно большей твердостью и устойчивостью к износу по сравнению с нержавеющей сталями. При этом коэффициент трения покрытия FeCrNiTiZrAl значительно ниже, чем у другого материала, что способствует увеличению срока службы изделий с таким покрытием.

Исследование [35] показало, что высокоэнтропийный сплав $\text{Al}_{0,6}\text{CoCrFeNiTi}$ является перспективным материалом для металлических теплоизоляционных покрытий благодаря сочетанию низкой теплопроводности и высокой термической стабильности.

В целом исследования свойств покрытий из высокоэнтропийных сплавов продемонстрировали их уникальные свойства и потенциальные приложения. Результаты исследований подтверждают потенциал ВЭС в области механических, антикоррозионных и теплоизоляционных свойств. Таким образом, покрытия из ВЭС могут стать перспективными материалами для различных индустрий, включая авиацию, автомобильное производство и биомедицинскую индустрию.

Коррозионная стойкость высокоэнтропийных сплавов

Коррозия является одной из основных причин разрушения материалов в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, нефтехимическая и морская техника. Поэтому

исследование коррозионной стойкости ВЭС имеет ключевое значение для их применения в экстремальных условиях эксплуатации. Данный раздел посвящен анализу коррозионных свойств ВЭС и механизмов их устойчивости к коррозии.

Исследование [36] показало, что добавление алюминия в высокоэнтروпийные сплавы FeCoCrNiAl_x , $x = 0, 1; 0,3$, улучшает их механические свойства и снижает вес. Анализировалось влияние алюминия на коррозионное поведение и свойства пленок сплавов в растворах H_2SO_4 . Результаты показали, что увеличение содержания алюминия улучшает устойчивость к коррозии в растворе H_2SO_4 .

Исследование [37] оценило коррозионную стойкость покрытий из высокоэнтропийного сплава FeCoNiCr , полученных методом электрохимического осаждения. Покрытия, синтезированные из растворов сульфатов Fe, Co, Ni и Cr, образовали зернистую поверхность без трещин размером от 500 нм до 5 мкм. Электрохимические измерения продемонстрировали высокую устойчивость покрытий к коррозии в различных средах, включая растворы NaCl , H_2SO_4 и NaOH . Исследование подчеркивает перспективность этих покрытий для применения в инженерной практике благодаря их отличной коррозионной стойкости.

В статье [38] рассматривается влияние ультразвуковой дробеструйной обработки на коррозионную стойкость и антибактериальные свойства высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0,3}\text{Cu}_{0,5}\text{CoCrFeNi}$. Основной целью исследования было устранение противоречий между коррозионной стойкостью и антибактериальными свойствами сплава путем использования ультразвуковой дробеструйной обработки. Результаты исследования подтвердили, что ультразвуковая дробеструйная обработка улучшила коррозионную стойкость и антибактериальные свойства высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0,3}\text{Cu}_{0,5}\text{CoCrFeNi}$. Электрохимические испытания показали, что ультразвуковая дробеструйная обработка способствовала образованию более защитной пассивной пленки, снижая плотность тока коррозии.

Учеными был разработан новый высокоэнтропийный сплав $\text{AlTiVCrCu}_{0,4}$, который имеет низкую плотность и высокую твердость. Исследование показало, что двухфазный высокоэнтропийный сплав $\text{AlTiVCrCu}_{0,4}$ обладает уни-

кальными механическими и коррозионными свойствами благодаря своей сложной структуре, состоящей из фаз ВСС и НСР. Сплав обладает выдающейся коррозионной стойкостью в агрессивной среде, что связано с формированием защитной пленки на основе оксидов металлов [39].

Исследование [40] рассматривает влияние холодной прокатки и отжига на коррозионные свойства сплава $\text{Al}_2\text{Cr}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_{53}\text{Ni}_{35}$ с акцентом на изменении размера зерен и их влиянии на коррозионное поведение. Результаты показывают, что уменьшение размера зерен способствует повышению локальной коррозионной стойкости материала. Разработанный сплав демонстрирует улучшенные антикоррозионные свойства, что делает его перспективным для морских применений. Наилучшие коррозионные свойства наблюдаются при уменьшении толщины на 85 % с трехминутным периодом отжига. Благородное поведение материала сохраняется при воздействии растворов с различной концентрацией морской воды.

Было исследовано влияние холодной прокатки и последеформационного отжига на свойства высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi [41]. Результаты показали, что размер зерен уменьшился с 207,5 до 4,6 мкм. Микротвердость, предел текучести и предел прочности при растяжении увеличились на 28, 68 и 24 % соответственно, однако относительное удлинение снизилось с 59,3 до 43,8%. Механизмы упрочнения связаны с уменьшением размера зерен и увеличением плотности дислокаций. Улучшилась также коррозионная стойкость сплава благодаря уменьшению зерен и остаточному напряжению сжатия.

Статья [42] рассматривает влияние трения с перемешиванием на способность сплава CoCrFeNiCu сопротивляться коррозии. Технология трения с перемешиванием включает в себя использование вращающегося инструмента, который перемещается по поверхности материала, генерируя высокую температуру и механические напряжения. Это приводит к пластическому деформированию и перемешиванию металла, что уменьшает размеры зерен сплава, улучшая его прочность и пластичность. После обработки сплав становится более устойчивым к коррозии за счет формирования более стабильной защитной пленки на поверхности.

В работе [43] исследовалось влияние термических ударов на микроструктуру, микротвердость и коррозионные свойства сплава $\text{VCrFeTa}_{0,2}\text{W}_{0,2}$ с пониженной активацией. После термических ударов содержание различных фаз в сплаве менялось, микротвердость увеличивалась, а коррозионная стойкость улучшалась. Сплав показал отличные свойства в условиях жестких окружающих сред, это делает его перспективным материалом для ядерных конструкций.

Из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что добавление различных элементов, улучшение методов синтеза и обработки сплавов, а также оптимизация структуры позволяют улучшить устойчивость материалов к коррозии. Важным фактором является влияние различных технологий обработки и отжига на микроструктуру и свойства сплавов. Исследования показывают, что оптимизация этих параметров может значительно повысить коррозионную стойкость материалов.

Термостойкость и термическая стабильность высокоэнтروпийных сплавов

Термостойкость и термическая стабильность играют важную роль при создании высокоэнтропийных сплавов, которые являются перспективным классом материалов с уникальными свойствами. В данном разделе будут рассмотрены основные аспекты, связанные с устойчивостью этих сплавов к высоким температурам и воздействию термических циклов. Будет проанализировано влияние состава сплава, процесса обработки и микроструктуры на его термические свойства, а также рассмотрены методы улучшения термостойкости и стабильности высокоэнтропийных сплавов.

В последние годы значительное внимание зарубежных исследователей привлекает разработка тугоплавких высокоэнтропийных сплавов (HEAs), которые рассматриваются как перспективный класс материалов для высокотемпературных приложений. Эти сплавы отличаются уникальными механическими свойствами и имеют потенциал для того, чтобы заменить традиционные жаропрочные сплавы на основе никеля в следующем поколении технологий [44].

Особое внимание в исследованиях уделяется применению электроосажденных наноструктурных сплавов, таких как NiFeCoW , NiFeCoMo

и NiFeCoMoW . Эти материалы обладают высокой термической и структурной стабильностью при повышенных температурах и демонстрируют значительное увеличение твердости после отжига. Электроосаждение является эффективным и доступным методом синтеза наноструктурных сплавов, обеспечивающим высокую термическую стабильность [45].

Важным аспектом также является использование методов, направленных на улучшение термической стабильности. Среди них особое значение имеют длительный отжиг и обработка кручением под высоким давлением (КВД). Длительный отжиг способствует рекристаллизации материала, что улучшает его свойства [46]. КВД представляет собой эффективный технологический процесс для изменения формы и структуры материалов путем вращения под давлением. Это находит применение в различных отраслях, включая металлургию, пластмассы и композиты [47].

Исследование [48] показало, что замена молибдена на ванадий в HEAs оказывает значительное влияние на их структурные и термические свойства. Этот подход приводит к образованию кристаллических частиц сложных нитридов в ленточной структуре, что положительно сказывается на термической стабильности и способствует стабилизации переохлажденной жидкости в сплавах с полностью аморфной структурой.

Дополнительно исследование [49] подтверждает, что термическая стабильность высокоэнтропийного сплава $\text{Cr}_{0,8}\text{FeMn}_{1,3}\text{Ni}_{1,3}$ существенно зависит от температуры старения. Во время обработки при 300°C микроструктура сплава остается стабильной с минимальными изменениями механических свойств. Однако при более высоких температурах (500 и 700°C) наблюдается сложное фазовое разложение, что существенно влияет на механические характеристики. Эти результаты подчеркивают необходимость строгого контроля параметров тепловой обработки для достижения оптимальных свойств высокоэнтропийных сплавов в различных инженерных приложениях.

В заключение следует отметить, что исследования в области высокоэнтропийных сплавов продолжают расширять наше понимание их потенциала для применения в высокотемпературных условиях. В целом исследования в этой

области продолжают открывать новые горизонты для создания материалов с оптимальными свойствами для будущих технологий.

Прочностные и пластические свойства ВЭС

В данном разделе рассмотрены новейшие достижения в области разработки и улучшения прочностных и пластических свойств HEAs, включая методы их синтеза и обработки, а также применение современных технологических подходов и моделирования.

Разработка новых сплавов с заложенными высокопрочностными свойствами

Активно ведется разработка по созданию новых сплавов с уже заложенными высокопрочностными свойствами. Был предложен легкий и тугоплавкий сплав AlNb_2TiV с плотностью $6,19 \text{ г/см}^3$ и удельным пределом текучести $167 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$. Отмечена хорошая деформируемость данного сплава [50]. В другом исследовании был успешно синтезирован матричный композит $\text{e}_{0,5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0,5}$ из высокоэнтروпийного сплава. Микроструктура композита оставалась стабильной после отжига при 1300°C в течение 168 ч. Он продемонстрировал замечательную прочность при высоких температурах, предел текучести около 901 МПа и истинный предел прочности на сжатие около 1186 МПа при 1200°C [51]. Композит создает идеальный баланс между сверхвысокой прочностью и высокой пластичностью при высоких температурах. Это открытие может стать важным вкладом в теоретические исследования и приложения в области высокотемпературного антиразмягчения. Большой предел прочности и текучести был отмечен в исследовании, посвященном ВЭС на основе Mo. Предел текучести при сжатии сплава M20 составляет до 1285 МПа, предел прочности – 2447 МПа, а относительное удлинение – 27 % [52].

Недавние исследования, проведенные в НИУ «БелГУ» [53], привели к разработке нового высокоэнтропийного сплава $\text{Co}_{40}\text{Mo}_{28}\text{Nb}_{25}\text{Hf}_7$, который продемонстрировал выдающиеся механические свойства при высоких температурах. Этот сплав, полученный методом вакуумно-дугового переплава, включает в себя фазы ОЦК и Лавеса C14, а также незначительное количество окси-

дов гафния. Исследования показали, что сплав обладает высоким пределом текучести при комнатной температуре (1775 МПа) и сохраняет значительную прочность при 1000°C (600 МПа). В диапазоне температур $22 \dots 1000^\circ\text{C}$ его удельная прочность превосходит многие коммерческие суперсплавы и другие высокоэнтропийные сплавы, что подчеркивает его потенциал для применения в высокотемпературных условиях.

Методы улучшения прочностных свойств

Улучшение прочностных свойств высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) может быть достигнуто различными методами, каждый из которых направлен на оптимизацию микроструктуры и фазового состава материалов.

Одним из таких методов является введение новых градиентных наноразмерных структур дислокационных ячеек в стабильную однофазную гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК) – кристаллическую структуру, в которой атомы расположены в углах и в центре каждой грани куба. Такая конфигурация обеспечивает материалу высокую пластичность и способность к деформации. Дислокационные ячейки, являясь участками локальной деформации в кристаллической решетке, создают дополнительное сопротивление движению дислокаций, что повышает прочность материала без очевидной потери пластичности [54].

Процесс внедрения таких структур включает в себя термомеханическую обработку, контролируемое охлаждение или использование наноразмерных добавок, способствующих формированию дислокационных ячеек с определенными характеристиками. В результате ВЭС с ГЦК-решеткой и градиентными структурами демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики, что делает их перспективными для эксплуатации под высокими нагрузками.

Другим методом является холодная прокатка и последующая лазерная термообработка поверхности. Холодная прокатка – это процесс деформации материала при низких температурах, который приводит к упрочнению материала за счет увеличения плотности дислокаций. Лазерная термообработка поверхности включает в себя использование лазера для локального нагрева и последующего охлаждения материала,

что позволяет модифицировать его микроструктуру и улучшить механические свойства [55].

Спинодальный распад, вызывающий композиционную неоднородность структуры, представляет собой процесс разделения твердого раствора на две фазы с различным химическим составом. В результате спинодального распада формируются нанометровые структуры, которые упрочняют материал. Такая композиционная неоднородность значительно повышает механические характеристики ВЭС, делая их более прочными и надежными для использования в условиях высоких нагрузок и температур [56].

Применение лазерного аддитивного производства для когерентного упрочнения сплавов является еще одним эффективным методом. Лазерное аддитивное производство – это технология, при которой материал добавляется послойно с использованием лазера. Данный метод позволяет точно контролировать микроструктуру и фазовый состав материала, что ведет к улучшению его прочностных свойств [57].

Таким образом, внедрение перечисленных методов позволяет значительно улучшить прочностные свойства ВЭС, обеспечивая высокую прочность и сохранение пластичности, что делает их перспективными для использования в различных высоконагруженных и высокотемпературных приложениях.

Прогнозирование свойств и моделирование

Исследования по повышению прочности высокоэнтропийных сплавов имеют стратегическое значение для создания более совершенных материалов, которые сочетают в себе прочность, легкость и устойчивость к различным условиям эксплуатации. Можно встретить исследования, посвященные прогнозированию прочности высокоэнтропийных сплавов, в частности на основе машинного обучения.

Машинное обучение (Machine Learning, ML) представляет собой подраздел искусственного интеллекта, который обучает компьютерные системы выполнять задачи, не явно запрограммированные для их выполнения. Вместо того чтобы использовать явные инструкции, машины обучаются на основе данных и алгоритмов, выявляя закономерности и делая прогнозы или принимая решения.

В области материаловедения и нанотехнологий многомасштабное моделирование стало важным инструментом для понимания свойств материалов на разных уровнях – от атомного до макроскопического. Использование суперкомпьютеров и высокопроизводительных вычислений позволяет моделировать сложные системы с миллионами атомов и молекул.

Одним из ключевых методов многомасштабного моделирования является метод молекулярной динамики, который позволяет моделировать динамику атомов и молекул на микроскопическом уровне [58]. Этот метод используется для изучения свойств материалов, таких как прочность, упругость, теплопроводность и др. На рис. 4 можно увидеть, как машинное обучение применяется в исследованиях ВЭС.

Кроме того, методы машинного обучения также играют важную роль в анализе данных о материалах. Эти методы применяются для классификации материалов, предсказания их свойств и оптимизации процесса производства. Например, алгоритмы машинного обучения могут быть использованы для определения оптимальной структуры материала или для предсказания его свойств на основе данных о его составе и структуре.

Таким образом, сочетание многомасштабного моделирования и машинного обучения позволяет получить более глубокое понимание свойств материалов и улучшить процесс их проектирования и производства.

С помощью комбинации машинного обучения, феноменологических правил и CALPHAD-моделирования были предсказаны новые перспективные составы тугоплавких высокоэнтропийных сплавов с заданным фазовым составом и механическими свойствами (пределом текучести). Подчеркивается, что создание и модификация свойств пятикомпонентных ВЭС возможно с помощью компьютерных программ CALPHAD, предназначенных для расчета фазовых диаграмм. Исследования, проведенные в Сибирском государственном индустриальном университете, показали, что расчеты фазовых диаграмм CALPHAD подтверждаются экспериментальными данными и позволяют разрабатывать сплавы нового поколения с заданными свойствами [59]. В табл. 2 представлено сравнение прогнозируемого и экспериментального

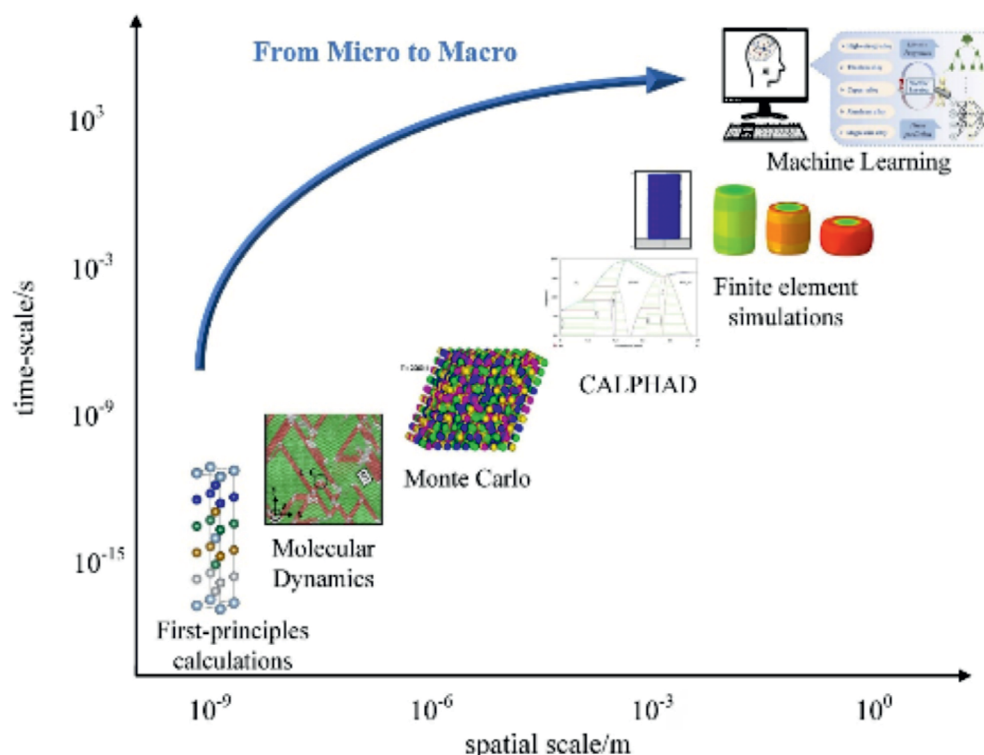


Рис. 4. Принципиальная диаграмма, иллюстрирующая применение многомасштабного моделирования и машинного обучения в исследованиях ВЭС [58]

Fig. 4. Schematic diagram illustrating the application of multiscale modeling and machine learning in HEA research [58]

Таблица 2

Table 2

Сравнение прогнозируемого и экспериментального значения предела текучести различных сплавов
Comparison of predicted and experimental yield strengths of various alloys

Сплав / High-entropy alloy	Температура, °C / Temperature, °C	Прогнозируемый пре- дел текучести, МПа / Predicted yield strength, MPa	Экспериментальный предел текучести, МПа / Experimental yield strength, MPa	Ошибка (%) / Error (%)
MoNbTaTiW [60]	1200	572	585	2,5
AlCrNbTiVZr [61]	600	1409	1093	13
AlCrNbTiVZr [62]	600	837	845	1

результата предела текучести для различных сплавов.

Можно отметить, что прогнозные значения предела текучести для сплавов в большинстве случаев показывают довольно хорошее совпадение с экспериментальными данными, однако имеются случаи, когда ошибки оценок достаточно значительны. Это может быть связано с различными факторами, такими как сложность структуры сплавов, влияние окружающей среды и др.

Относительно перспектив использования машинного обучения в данном контексте следует отметить, что методы машинного обучения могут быть эффективно применены для прогнозирования свойств материалов на основе данных об их составе, структуре и условиях эксплуатации. Это может помочь улучшить точность прогнозирования свойств сплавов и оптимизировать процессы разработки новых материалов с заданными характеристиками.

Исследования пластичности и деформируемости

Исследование пластичности и деформируемости высокоэнтропийных сплавов представляет собой важную область, поскольку эти свойства существенны для их применения в различных отраслях. Указанная тема освещается учеными с разных направлений: исследуется пластическая деформация высокоэнтропийных сплавов под механической обработкой [63] и одновременное повышение прочности и пластичности высокоэнтропийного сплава с помощью механизма очистки [64]. Изучено также влияние электронного облучения на микроструктуру и пластичность после отжига при промежуточной температуре. Суть пластичности, вызванной облучением, заключается в измельчении и перераспределении нанопреципитатов. Оптимизация размера и распределения улучшила взаимодействие между нанопреципитатами и дислокациями, эффективно предотвращая хрупкие переломы, вызванные концентрацией напряжений [65].

Повышение термоустойчивости и пластичности ВЭС достигается путем введения в них твердых и хрупких боридов. Бориды обеспечивают многократное повышение пластичности материалов без ущерба для их прочности. Кроме того, вблизи боридов происходит химический переход порядок-беспорядок, что улучшает подвижность дислокаций и способствует пластической деформируемости материала. Наличие стабильных боридов также предотвращает укрупнение зерен в материале при повышенных температурах, поскольку бориды закрепляют зерна и стабилизируют их размеры [66].

Таким образом, данный раздел подчеркивает важность комплексного подхода к разработке и улучшению ВЭС, включая синтез новых сплавов, совершенствование методов обработки и применение современных технологий моделирования и прогнозирования. Это способствует созданию материалов с уникальными комбинациями прочностных и пластических свойств, необходимых для использования в экстремальных условиях эксплуатации.

Электропроводящие и магнитные свойства

Исследования высокоэнтропийных сплавов в области электрических и магнитных полей предоставляют новые возможности для создания

материалов с уникальными электромагнитными свойствами, это позволяет развивать энергосберегающие технологии, электрические проводники, сенсоры или элементы электроники.

Изменение электропроводящих свойств высокоэнтропийных сплавов зависит от нескольких факторов, таких как состав сплава, температура, давление и наличие примесей. Обработка отжигом является важным методом влияния на электропроводящие свойства ВЭС. Термическая обработка может приводить к изменению микроструктуры сплава, включая рекристаллизацию зерен, уменьшение дислокаций и изменение фазового состава, что влияет на электрическую проводимость материала. Например, отжиг может способствовать восстановлению электропроводящих свойств после механической деформации или улучшению структурной однородности сплава [67, 68].

На изменение электропроводящих свойств может повлиять давление. В нормальном состоянии сплав TiZrHfNb демонстрирует высокое электрическое сопротивление, которое практически не зависит от температуры, но в значительной степени зависит от давления – линейно уменьшается на 12,5 % при повышении давления до 5,5 ГПа [69].

В рамках электропроводящих свойств можно отметить исследование, посвященное обработке поверхности электроимпульсной ультразвуковой прокаткой [70]. В работе использовались пять элементов: хром (Cr), марганец (Mn), железо (Fe), кобальт (Co) и никель (Ni), с высокой степенью чистоты (99,9 %) и эквимольным соотношением. Эти элементы были расплавлены в вакуумной плавильной печи с использованием электромагнитной индукции, что обеспечило высокую однородность состава сплава.

Основным достижением исследования стало значительное улучшение прочностных характеристик сплава на разрыв при комнатной температуре благодаря применению метода ультразвуковой прокатки поверхности. Этот процесс осуществлялся на специальной платформе для самостоятельной сборки, что позволяет точно контролировать параметры обработки и обеспечивать высокую воспроизводимую результатов (рис. 5). Ультразвуковая обработка поверхности способствует улучшению механических свойств материала путем снижения микропористости и

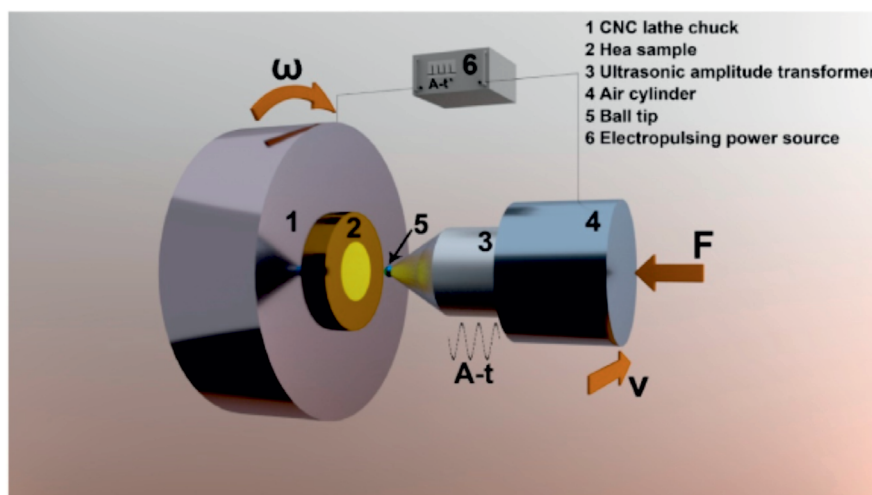


Рис. 5. Схема процесса электроимпульсной ультразвуковой поверхностной прокатки [70]

Fig. 5. Electropulse ultrasonic surface rolling process diagram [70]

улучшения адгезии на границах зерен, это имеет большое значение для его электропроводящих свойств.

Магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов представляют собой одну из наиболее интересных и малоизученных областей в материаловедении. В частности, атомная структура ВЭС является фактором, влияющим на их магнитные свойства.

Исследование показало, что сплав CoCuFeMnNi , полученный с использованием методов механического сплавления и спекания в искровой плазме, обладает значительными магнитными свойствами, включая высокую индукцию насыщения и низкую коэрцитивную силу при заданных магнитных условиях. Эти характеристики делают сплав CoCuFeMnNi перспективным материалом для применения в области мягкой магнитной техники [71].

В исследовании [72] провели замену марганца хромом в высокоэнтропийном сплаве FeCoNiAlMn , что существенно повлияло на его магнитные свойства. Наилучшие результаты достигаются при определенной концентрации хрома, при которой наблюдается значительное повышение индукции насыщения. В частности, сплав $\text{FeCoNiAlMn}_{0,4}\text{Cr}_{0,6}$ демонстрирует оптимальные магнитные характеристики, это делает его перспективным кандидатом для применения в мягкой магнитной технике. Описанный эффект связан с изменением микроструктуры

и размеров кристаллитов в зависимости от содержания Cr, что влияет на магнитные свойства сплава.

Исследование электропроводящих и магнитных свойств высокоэнтропийных сплавов подчеркивает их потенциал для создания материалов с уникальными характеристиками в электрических и магнитных приложениях. Влияние состава сплава, термической обработки и давления на электропроводящие свойства активно изучается, что открывает пути для управления электрической проводимостью.

Оптимизация микроструктуры и состава сплавов, включая замену марганца на хром, также способствует улучшению магнитных свойств.

Перспективы применения высокоэнтропийных сплавов

Несмотря на значительное количество исследований, высокоэнтропийные сплавы остаются перспективной темой для изучения. Это связано с их уникальными свойствами, такими как высокая прочность, коррозионная стойкость, износостойкость и др.

Кроме того, эти сплавы имеют большой потенциал для применения в различных отраслях промышленности. Китайские исследователи видят большую перспективность применения таких сплавов в энергетике – в частности, создание суперконденсатора, новых электродных и диэлектрических материалов, разработка твердоок-

сидного топливного элемента [73]. В Сибирском государственном индустриальном университете говорят о применении ВЭС в качестве покрытий деталей судов, в разнородных сварных соединениях и деталях ядерных реакторов [74]. В Южно-Уральском государственном университете в результате выполненной работы было установлено, что прочностные и пластические свойства рассмотренных ВЭС соответствуют лучшим образцам высоколегированных аустенитных сталей, применяемых для криогенной техники [75]. В Воронежском государственном лесотехническом университете им. Г.Ф. Морозова говорят о перспективе применения высокоэнтروпийных сплавов для восстановления деталей машин атмосферным плазменным напылением [76]. В The University of Manchester считают, что расширенная композиционная свобода, предоставляемая высокоэнтропийными сплавами, дает уникальную возможность разработки сплавов для передовых ядерных применений – в частности, там, где существующие технические сплавы не справляются [77].

Обсуждение

Исследование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) является актуальной и перспективной темой в современном материаловедении, которая охватывает широкий спектр научных и инженерных исследований. Целью настоящей работы было освещение последних достижений в этой области, проведение сравнительного анализа опубликованных исследований и выявление наиболее перспективных направлений для дальнейших исследований.

В разделе о методах получения ВЭС рассмотрены различные технологии, включая механическое сплавление, вакуумную индукционную плавку, а также методы добавления легирующих элементов. Эти методы направлены на достижение высокой однородности состава и микроструктуры сплавов, что критически важно для их механических и физических свойств.

Легирование высокоэнтропийных сплавов играет ключевую роль в тюнинге их химического состава для оптимизации механических, термических и коррозионных свойств. Покрытия на основе ВЭС представляют собой перспективное направление для защиты материалов от корро-

зии и износа, что особенно важно в авиационной и ядерной промышленности.

Особое внимание уделено исследованиям термостойкости и термической стабильности ВЭС, которые важны при применении в экстремальных условиях, таких как высокие температуры и агрессивные окружающие среды.

Прочностные и пластические свойства ВЭС оказываются на передовой линии изучения, поскольку эти материалы часто превосходят традиционные сплавы в показателях прочности и устойчивости к деформации.

Наиболее перспективным направлением для дальнейшего изучения можно считать электропроводящие и магнитные свойства высокоэнтропийных сплавов. Это направление открывает значительные возможности для разработки новых энергосберегающих технологий, высокоэффективных сенсоров и магнитных материалов, что может привести к существенным инновациям в таких областях, как электроника, энергетика и информационные технологии.

Заключение

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что высокоэнтропийные сплавы представляют собой перспективный класс материалов с огромным потенциалом для инноваций. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение знаний в области составов, методов и свойств ВЭС, а также на разработку новых материалов с улучшенными характеристиками. Это откроет новые горизонты для технологических достижений, улучшит эффективность и надежность материалов, используемых в различных секторах промышленности.

Список литературы

1. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh, S.K. Chen, S.J. Lin, J.Y. Gan, T.S. Chin, T.T. Shun, C.H. Tsau, S.Y. Chang // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 6. – P. 299–303. – DOI: 10.1002/adem.200300567.
2. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – Vol. 375–377. – P. 213–218. – DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.

3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2020. – Vol. 121 (8). – P. 733–764. – DOI: 10.1134/S0031918X20080098. – EDN: TY-MYVL.
4. Cui K., Zhang Y. High-entropy alloy films // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13 (3). – P. 635. – DOI: 10.3390/coatings13030635.
5. On the laser additive manufacturing of high-entropy alloys: a critical assessment of in-situ monitoring techniques and their suitability / M.A. Mahmood, F.G. Alabtah, Y. Al-Hamidi, M. Khraisheh // *Materials & Design*. – 2023. – Vol. 226. – P. 111658. – DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111658.
6. Achieving excellent wear and corrosion properties in laser additive manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloy by laser shock peening / Z. Tong, X. Pan, W. Zhou, Y. Yang, Y. Ye, D. Qian, X. Ren // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 422. – P. 127504. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127504.
7. Исследование сплава, полученного методом дуговой наплавки высокоэнтروпийной порошковой проволокой / Р.Е. Крюков, А.Р. Михно, С.В. Коновалов, И.А. Панченко, И.А. Махнев // *Ползуновский вестник*. – 2024. – № 2. – С. 228–234. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.030. – EDN: OCJLCW.
8. Effect of Mo addition on microstructural evolution and corrosion behaviors of AlCrFeNi₃ eutectic high-entropy alloy / J. Wang, H. Jiang, W. Xie, X. Kong, S. Qin, H. Yao, Y. Li // *Corrosion Science*. – 2024. – Vol. 229. – P. 111879. – DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111879.
9. Zeng W.P., Chen Y., Ye J. Effect of partial substitution of Cr with Co on the properties of Fe₃₅Ni₂₀Cr₂₀_xCo_xMo₅P₁₂C₄B₄ high-entropy bulk metallic glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2024. – P. 625. – DOI: 10.2139/ssrn.4563223.
10. Significant improvement in wear resistance of CoCrFeNi high-entropy alloy via boron doping / H. Zhang, J. Miao, C. Wang, T. Li, L. Zou, Y. Lu // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11. – P. 386. – DOI: 10.3390/lubricants11090386.
11. Effect of Nb addition on the corrosion and wear resistance of laser clad AlCr2FeCoNi high-entropy alloy coatings / X. Ji, K. Guan, Y. Bao, Z. Mao, F. Wang, H. Dai // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 12. – P. 5. – DOI: 10.3390/lubricants12010005.
12. Effect of tungsten carbide (WC) on electrochemical corrosion behavior, hardness, and microstructure of CrFeCoNi high entropy alloy / A.H. Khallaf, M. Bhlol, O.M. Dawood, I.M. Ghayad, O.A. Elkady // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2022. – Vol. 69. – P. 97. – DOI: 10.1186/s44147-022-00097-1.
13. A novel strategy for architecting low interfacial energy transition phase to enhance thermal stability in a high-entropy alloy / Y. Zhang, N. Qiu, Z. Shen, C. Liu, X. Zuo // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 947. – P. 169570. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169570.
14. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1907. – DOI: 10.3390/met11121907.
15. Polat G., Tekin M., Kotan H. Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy // *Intermetallics*. – 2022. – P. 107589. – DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107589.
16. Температурная зависимость деформационного поведения высокоэнтропийных сплавов Co₂₀Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀, Co₁₉Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₁ и Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃. Механические свойства и температурная зависимость предела текучести / Е.Г. Астафурова, К.А. Реунова, С.В. Астафуров, Д.О. Астапов // *Физическая мезомеханика*. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 5–16. – DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_5. – EDN: OLJPSG.
17. Enhancement of strength-ductility balance of heavy Ti and Al alloyed FeCoNiCr high-entropy alloys via boron doping / Y. Qi, T. Cao, H. Zong, Y. Wu, L. He, X. Ding, F. Jiang, S. Jin, G. Sha, J. Sun // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2020. – Vol. 75. – P. 154–166. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.023.
18. Tailoring strength and ductility of high-entropy CrMnFeCoNi alloy by adding Al / X. Xian, Z.-H. Zhong, L.-J. Lin, Z.-X. Zhu, C. Chen, Y.-C. Wu // *Rare Metals*. – 2018. – Vol. 41. – P. 1015–1021. – DOI: 10.1007/s12598-018-1161-4.
19. Hardness and strength enhancements of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with Nd doping / C. Wang, T.-H. Li, Y.-C. Liao, C.-L. Li, J.S.-C. Jang, C.-H. Hsueh // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – P. 138192. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138192.
20. Excellent plasticity of C and Mo alloyed TRIP high entropy alloy via rolling and heat treatment / Z. Pengjie, W. Shuhuan, L. Yukun, C. Liansheng, L. Kun, Z. Dingguo // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 2145–2151. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.018.
21. Enhanced strength and plasticity of selective laser melted NbMoTaW refractory high-entropy alloy via carbon microalloying / J. Xu, R. Duan, K. Feng, C. Zhang, P. Liu, Z. Li // *SSRN Electronic Journal*. – 2022. – DOI: 10.2139/ssrn.4108454.
22. Influence of hydrogen on incipient plasticity in CoCrFeMnNi high-entropy alloy / G. Yang, Y. Zhao, D.-H. Lee, J.-M. Park, M.-Y. Seok, J.-Y. Suh, U. Ramamurty, J.-I. Jang // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 161. – P. 23–28. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.010.



23. Effects of tailoring Zn additions on the microstructural evolution and electrical properties in GaInSnZn high-entropy alloys / J. Bai, Z. Wang, M. Zhang, J. Qiao // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25. – P. 2201831. – DOI: 10.1002/adem.202201831.

24. Effect of Cu content on electrical resistivity, mechanical properties and corrosion resistance of AlCuNiTiZr_{0.75} high entropy alloy films / K. Huang, G. Wang, H. Qing, Y. Chen, H. Guo // *Vacuum*. – 2021. – Vol. 195. – P. 110695. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110695.

25. Enhancing fatigue life by ductile-transformable multicomponent B₂ precipitates in a high-entropy alloy / R. Feng, Y. Rao, C. Liu, X. Xie, D. Yu, Y. Chen, M. Ghazisaeidi, T. Ungar, H. Wang, K. An, P.K. Liaw // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. – P. 1–12. – DOI: 10.1038/s41467-021-23689-6.

26. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1907. – DOI: 10.3390/met11121907.

27. Покрyтия из высокоэнтропийных сплавов: состояние проблемы и перспективы развития / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, О.А. Перегудов, М.О. Ефимов, Ю.А. Шлярова // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2022. – Т. 65, № 10. – С. 683–692. – DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-683-692.

28. High-entropy alloy based coatings: microstructures and properties / Y. Chen, P. Munroe, Z. Xie, S. Zhang // *Protective thin coatings technology*. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2021. – P. 205–232. – DOI: 10.1201/9781003088349-6.

29. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating / G. Jin, Z. Cai, Y. Guan, X. Cui, Z. Liu, Y. Li, M. Dong, D. Zhang // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 445. – P. 113–122. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.135.

30. Preparing high-entropy ceramic films from high-entropy alloy substrate / F. Li, W. Cui, Y. Shao, J. Zhang, S. Du, Z. Chen, Z. Tian, K. Chen, G. Liu // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – Vol. 287. – P. 126365. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126365.

31. A novel magnetic FeCoNiCuAl high-entropy alloy film with excellent corrosion resistance / B. Li, H. Li, Y. Xia, M. Chen, Z. Wu, X. Tan, H. Xu // *SSRN Electronic Journal*. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4392421.

32. Lin C., Yao Y. Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 205. – DOI: 10.3390/met13020205.

33. Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М. Высокоэнтропийные покрытия FeCoCrNiMoTiW и их свойства // *Евразийский союз ученых. Серия: Технические и физико-математические науки*. – 2021. – № 6 (87). – С. 12–16. – DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.87.1386.

34. Yurov V.M., Eremin E.N., Guchenko S. Microhardness and wear resistance of a high-entropy coating FeCrNiTiZrAl // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2182. – DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012083.

35. Novel candidate of metal-based thermal barrier coatings: high-entropy alloy / X. Wang, H. Yao, L. Yuan, L. Chen, F. Xu, Z. Tan, D. He, Y. Yang, Y. Liu, Z. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 474. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130087.

36. The corrosion behavior and film properties of Al-containing high-entropy alloys in acidic solutions / Y. Fu, C. Dai, H. Luo, D. Li, C. Du, X. Li // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 560. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149854.

37. Electrochemical deposition and corrosion resistance characterization of FeCoNiCr high-entropy alloy coatings / Z. Xu, Y. Wang, X. Gao, L. Peng, Q. Qiao, J. Xiao, F. Guo, R. Wang, J. Yu // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – P. 1167. – DOI: 10.3390/coatings13071167.

38. Effects of ultrasonic shot peening on the corrosion resistance and antibacterial properties of Al_{0.3}Cu_{0.5}CoCrFeNi high-entropy alloys / X. Chen, T. Cui, S. He, W. Chang, Y. Shi, Y. Lou // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – P. 246. – DOI: 10.3390/coatings13020246.

39. Investigation of mechanical and corrosion properties of light and high hardness cast AlTiVCrCu_{0.4} high entropy alloy / K. Liu, X. Li, J. Wang, Y. Zhang, X. Guo, S. Wu, H. Yu // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 200. – DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112878.

40. The grain size effect on corrosion property of Al₂Cr₅Cu₅Fe₅₃Ni₃₅ high-entropy alloy in marine environment / L. Xue, Y. Ding, K. Pradeep, R. Case, H. Castaneda, M. Paredes // *Corrosion Science*. – 2022. – Vol. 208. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110625.

41. Improved mechanical and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy with cold rolling and post deformation annealing process / Y. Zou, S. Li, S. Liu, J. Li, Y. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 887. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161416.

42. Simultaneously increasing mechanical and corrosion properties in CoCrFeNiCu high entropy alloy via friction stir processing with an improved hemispherical convex tool / N. Li, H. Zhang, L. Wu, Z. Li, H. Fu, D. Ni, P. Xue, F. Liu, B. Xiao, Z. Ma // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 203. – DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113143.

43. Effects of transient thermal shock on the microstructures and corrosion properties of a reduced activation high-entropy alloy / W.-R. Zhang, W.-B. Liao, P.K. Liaw, J.-L. Ren, J. Brechtel, Y. Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – Vol. 918. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165762.

44. Refractory high-entropy alloys: a focused review of preparation methods and properties / W. Xiong,

A.X. Guo, S. Zhan, C.T. Liu, S.C. Cao // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 142. – P. 196–215. – DOI: 10.1016/j.jmst.2022.08.046.

45. Haché M.J., Zou Y., Erb U. Thermal stability of electrodeposited nanostructured high-entropy alloys // Surface and Coatings Technology. – 2024. – Vol. 474. – P. 130719. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130719.

46. Alloying behavior and thermal stability of mechanically alloyed nano AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy / V. Shivam, Y. Shadangi, J. Basu, N.K. Mukhopadhyay // Journal of Materials Research. – 2019. – Vol. 34. – P. 787–795. – DOI: 10.1557/jmr.2019.5.

47. Hardening and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeNiMnTi high-entropy alloy processed by high-pressure torsion / H. Shahmir, M. Nili-Ahmadabadi, A. Shafie, T. Langdon // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 194. – DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012017.

48. Влияние замены молибдена на ванадий на склонность к аморфизации, структуру и теплофизические свойства высокоэнтروпийных сплавов системы Fe-Co-Ni-Cr-(Mo,V)-B / А.И. Базлов, И.В. Строчко, Е.Н. Занаева, Е.В. Убивовка, М.С. Пархоменко, Д.А. Милькова, В.В. Брюханова // Металлург. – 2023. – № 11. – С. 86–92. – DOI: 10.52351/00260827_2023_11_86.

49. Role of aging temperature on thermal stability of Co-free $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}_{1.3}$ high-entropy alloy: decomposition and embrittlement at intermediate temperatures / H. Sun, T. Liu, H. Oka, N. Hashimoto, Y. Cao, R. Luo // Materials Characterization. – 2024. – Vol. 210. – P. 113804. – DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113804.

50. A novel lightweight refractory high-entropy alloy with high specific strength and intrinsic deformability / X. Liu, Z. Bai, X. Ding, J. Yao, L. Wang, Y. Su, Z. Fan, J. Guo // Materials Letters. – 2020. – Vol. 287. – P. 129255. – DOI: 10.1016/j.matlet.2020.129255.

51. High-temperature ultra-strength of dual-phase $\text{Re}_{0.5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0.5}$ high-entropy alloy matrix composite / Q. Wei, G. Luo, R. Tu, J. Zhang, Q. Shen, Y. Cui, Y. Gui, A. Chiba // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 84. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.12.015.

52. Development of high strength high plasticity refractory high entropy alloy based on Mo element optimization and advanced forming process / H. Zhang, J. Cai, J. Geng, X. Sun, Y. Zhao, X. Guo, D. Li // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 112. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106163.

53. Высокоэнтропийный сплав на основе системы Co-Mo-Nb-Hf с высокой прочностью при 1000 °C / Е.С. Панина, Н.Ю. Юрченко, А. Тожибаев, С.В. Жеребцов, Н.Д. Степанов // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022

(ICMSSTE 2022): материалы Международной научно-практической конференции. – Симферополь, 2022. – С. 128–134. – EDN ZCNRGA.

54. Gradient cell-structured high-entropy alloy with exceptional strength and ductility / Q. Pan, L. Zhang, R. Feng, Q. Lu, K. An, A.C. Chuang, J.D. Poplawsky, P.K. Liaw, L. Lu // Science. – 2021. – Vol. 374. – P. 984–989. – DOI: 10.1126/science.abj8114.

55. Enhanced strength-ductility of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with inverse gradient-grained structure prepared by laser surface heat-treatment technique / B. Zhang, J. Chen, P. Wang, B. Sun, Y. Cao // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 111. – P. 111–119. – DOI: 10.1016/j.jmst.2021.09.043.

56. Achieving high strength and ductility in high-entropy alloys via spinodal decomposition-induced compositional heterogeneity / Y. Chen, Y. Fang, R. Wang, Y. Tang, S. Bai, Q. Yu // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 141. – P. 149–154. – DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.018.

57. Design and coherent strengthening of ultra-high strength refractory high entropy alloys based on laser additive manufacturing / J. Cai, H. Zhang, L. Wang, X. Sun, X. Xu, X. Guo, D. Li // SSRN Electronic Journal. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4469753.

58. Jiang D., Xie L., Wang L. Current application status of multi-scale simulation and machine learning in research on high-entropy alloys // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 1341. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.233.

59. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, С. Чен, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, В.В. Шляров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 2 (44). – С. 3–12. – DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12. – EDN ICZXP.

60. Machine learning-based strength prediction for refractory high-entropy alloys of the Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr system / D. Klimenko, N. Stepanov, J. Li, Q. Fang, S. Zherebtsov // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 7213. – DOI: 10.3390/ma14237213.

61. Yield strength prediction of high-entropy alloys using machine learning / U. Bhandari, R. Rafi, C. Zhang, S. Yang // Materials Today Communications. – 2020. – Vol. 26. – P. 101871. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101871.

62. Prediction of strength characteristics of high-entropy alloys Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr systems / D.N. Klimenko, N.Y. Yurchenko, N.D. Stepanov, S.V. Zherebtsov // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38. – P. 1535. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.145.

63. Li J., Fang Q. Investigation into plastic deformation and machining-induced subsurface damage of



high-entropy alloys // Simulation and experiments of material-oriented ultra-precision machining. – Springer, 2019. – P. 23–52. – DOI: 10.1007/978-981-13-3335-4_2.

64. Plasticity of CrMnFeCoNi high-entropy alloy via a purification mechanism / C. Wu, J. Li, W. Qiu, F. Lian, L. Huang, J. Zhu, L. Chen // SSRN Electronic Journal. – 2023. – DOI: 10.2139/ssrn.4415770.

65. Enhanced plasticity in a Zr-rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation / J. Hao, Y. Zhang, Q. Wang, Y. Ma, L. Sun, Z. Zhang // Journal of Nuclear Materials. – 2023. – Vol. 590. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154876.

66. Enhanced plasticity in refractory high-entropy alloy via multicomponent ceramic nanoparticle / H. Li, F. Cao, T. Li, Y. Tan, Y. Chen, H. Wang, P.K. Liaw, L. Dai // Journal of Materials Science & Technology. – 2024. – Vol. 194. – P. 51–62. – DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.030.

67. High temperature electrical properties and oxidation resistance of V-Nb-Mo-Ta-W high entropy alloy thin films / Y.-Y. Chen, S.-B. Hung, C.-J. Wang, W.-C. Wei, J.-W. Lee // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 375. – P. 854–863. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.080.

68. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy / Z. Nong, J. Zhu, X. Yang, H. Yu, Z. Lai // Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition. – 2013. – Vol. 28. – P. 1196–1200. – DOI: 10.1007/s11595-013-0844-9.

69. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy / S. Uporov, R. Ryltsev, V. Sidorov, S.K. Estemirova, E. Sterkhov, I. Balyakin, N. Chtchelkatchev // Intermetallics. – 2022. – Vol. 140. – DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107394.

70. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling / J. Xie, S. Zhang, Y. Sun, Y. Hao, B. An, Q. Li, C.A. Wang // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 795. – P. 140004. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.140004.

71. Fabrication of a novel magnetic high entropy alloy with desirable mechanical properties by mechanical

alloying and spark plasma sintering / M. Karimi, M. Shamsanian, M. Enayati, M. Adamzadeh, M. Imani // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 84. – P. 859–870. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.048.

72. Effect of Cr-doping on the structural and magnetic properties of mechanically alloyed FeCoNiAlMn-Cr high-entropy alloy powder / D.N. Siddiqui, N. Mehboub, A. Zaman, A.M. Alsuhaibani, A. Algahtani, V. Tirth, S. Alharthi, N.H. Al-Shaalan, M.A. Amin // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8. – P. 19892. – DOI: 10.1021/acsomega.3c01823.

73. $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$ high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature / Z. Dong, S. Huang, V. Ström, G. Chai, L.K. Varga, O. Eriksson, L. Vitos // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 79. – P. 15–20. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.071.

74. Application of high-entropy alloys / V.E. Grovov, Y.A. Shlyarova, S.V. Konovalov, S.V. Vorob'ev, O.A. Peregudov // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2021. – Vol. 64. – P. 747. – DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754.

75. Перспективы применения высокоэнтروпийных сплавов для техники при криогенных температурах / И.И. Сулейманова, М.А. Иванов, А.К. Тиньгаев, Е.А. Трофимов // EURASTRENCOLD-2022: сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 г. – Киров, 2022. – С. 418–422. – EDN TAEIPM.

76. Кадырметов А.М., Попов Д.А., Снятков Е.В. Перспективы применения высокоэнтропийных сплавов для восстановления деталей машин атмосферным плазменным напылением // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 1 (72). – С. 20–27. – DOI: 10.33979/2073-7432-2021-72-1-20-27. – EDN DCXPHK.

77. High-entropy alloys for advanced nuclear applications / E.J. Pickering, A.W. Carruthers, P.J. Barron, S.C. Middleburgh, D.E.J. Armstrong, A.S. Gandy // Entropy. – 2021. – Vol. 23. – P. 98. – DOI: 10.3390/e23010098.

Конфликт интересов

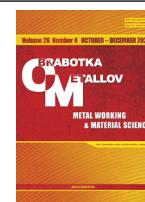
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application

Anna Shubert ^{a, *}, Sergey Konovalov ^b, Irina Panchenko ^c

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-7355-2955>, shubert-anna@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>, konovalov@sibsiu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>, i.r.i.ss@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 April 2024

Revised: 17 May 2024

Accepted: 17 September 2024

Available online: 15 December 2024

Keywords:

High-entropy alloys

Wear resistance

Heat resistance

Thermal stability

Plasticity

Alloying

Funding

This study is funded by a grant of the Russian Science Foundation, project 23-49-00015. <https://rscf.ru/en/project/23-49-00015/>.

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the prospects for studying high-entropy alloys (*HEA*), metal materials with unique properties. The study of high-entropy alloys is an urgent area of research in connection with its properties, environmental sustainability, economic benefits and technological potential. *HEA* are of interest to researchers due to its stability, strength, corrosion resistance and other characteristics, which makes it promising for use in the aerospace industry, automotive, medicine and microelectronics. Thus, *HEA* research contributes to the development of new materials and technological progress, providing opportunities for creating innovative products and improving existing solutions. To effectively use the potential of high-entropy alloys, research is required in a number of areas. First, it is necessary to improve the production technology of such alloys and develop new methods for obtaining *HEA* with improved characteristics and reduced cost. Secondly, it is necessary to establish the basic principles of operation of high-entropy alloys and to study the mechanisms influencing its properties. It is also necessary to develop new alloys with specified properties and conduct experiments and computer simulations to optimize the characteristics of the alloys and determine the best compositions. **The purpose of the work** is to study developments in the field of high-entropy alloys and conduct a comparative analysis of published studies on improving the properties of high-entropy alloys. **The research method** is a review and analysis based on developments mainly for 2020-2024, which were carried out by domestic and foreign scientists. The paper discusses the prospects for the study of high-entropy alloys, materials with a wide range of applications in various industries. The paper presents the results of research, mainly for 2020-2024. The main properties of high-entropy alloys are described, such as high strength, corrosion resistance, fatigue properties, plasticity and deformability, thermal stability, electrical conductivity and magnetic properties, as well as the possibility of creating alloys with specified characteristics. The most common methods of changing the properties of alloys have been identified. The directions of further development of research in this area are considered. **Results and discussion:** a literature review shows that developments and research are carried out on all possible properties of *HEA*, but most of it is devoted to corrosion-resisting properties and thermal stability. Of the methods used in high-entropy alloys, the most common and universal can be considered the alloying of high-entropy alloys with other metals. Studies also confirm that alloying metals are selected depending on its characteristic properties. The number of scientific works also confirms the relevance of this topic and the need for its study. The authors noted that future studies on the fatigue properties of high-entropy alloys, as well as the properties of alloys under the influence of magnetic and electric fields are the most interesting.

For citation: Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.A. A review of research on high-entropy alloys, its properties, methods of creation and application. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 153–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-153-179. (In Russian).

References

1. 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, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

* Corresponding author

Shubert Anna V., Post-graduate Student
 Siberian State Industrial University,
 42 Kirova st.,
 654007, Novokuznetsk, Russia

Tel.: +7 913 437-89-70, e-mail: shubert-anna@mail.ru



2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121 (8), pp. 733–764. DOI: 10.1134/S0031918X20080098.
4. Cui K., Zhang Y. High-entropy alloy films. *Coatings*, 2023, vol. 13 (3), p. 635. DOI: 10.3390/coatings13030635.
5. Mahmood M.A., Alabtah F.G., Al-Hamidi Y., Khraisheh M. On the laser additive manufacturing of high-entropy alloys: A critical assessment of in-situ monitoring techniques and their suitability. *Materials & Design*, 2023, vol. 226, p. 111658. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111658.
6. Tong Z., Pan X., Zhou W., Yang Y., Ye Y., Qian D., Ren X. Achieving excellent wear and corrosion properties in laser additive manufactured CrMnFeCoNi high-entropy alloy by laser shock peening. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 422, p. 127504. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127504.
7. Kryukov R.E., Mikhno A.R., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Makhnev I.A. Issledovaniye splava, poluchennogo metodom dugovoy naplavki vysokoentropiynoy poroshkovoy provolokoy [Investigation of an alloy produced by the method of arc surface welding with high entropy fluid wire]. *Polzunovskiy vestnik*, 2024, no. 2, pp. 228–222. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.030. (In Russian).
8. Wang J., Jiang H., Xie W., Kong X., Qin S., Yao H., Li Y. Effect of Mo addition on microstructural evolution and corrosion behaviors of AlCrFeNi₃ eutectic high-entropy alloy. *Corrosion Science*, 2024, vol. 229, p. 111879. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111879.
9. Zeng W.P., Chen Y., Ye J. Effect of partial substitution of Cr with Co on the properties of Fe₃₅Ni₂₀Cr_{20-x}Co_xMo₅P₁₂C₄B₄ high-entropy bulk metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2024, p. 625. DOI: 10.2139/ssrn.4563223.
10. Zhang H., Miao J., Wang C., Li T., Zou L., Lu Y. Significant improvement in wear resistance of CoCrFeNi high-entropy alloy via boron doping. *Lubricants*, 2023, vol. 11, p. 386. DOI: 10.3390/lubricants11090386.
11. Ji X., Guan K., Bao Y., Mao Z., Wang F., Dai H. Effect of Nb addition on the corrosion and wear resistance of laser clad AlCr2FeCoNi high-entropy alloy coatings. *Lubricants*, 2023, vol. 12, p. 5. DOI: 10.3390/lubricants12010005.
12. Khallaf A.H., Bhlol M., Dawood O.M., Ghayad I.M., Elkady O.A. Effect of tungsten carbide (WC) on electrochemical corrosion behavior, hardness, and microstructure of CrFeCoNi high entropy alloy. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, vol. 69, p. 97. DOI: 10.1186/s44147-022-00097-1.
13. Zhang Y., Qiu N., Shen Z., Liu C., Zuo X. A novel strategy for architecting low interfacial energy transition phase to enhance thermal stability in a high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 947, p. 169570. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.169570.
14. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1907. DOI: 10.3390/met11121907.
15. Polat G., Tekin M., Kotan H. Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 2022, p. 107589. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107589.
16. Astafurova E.G., Reunova K.A., Astafurov S.V., Astapov D.O. Temperature dependence of the deformation behavior of high-entropy alloys Co₂0Cr₂0Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀, Co₁₉Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₁, and Co₁₇Cr₂₀Fe₂₀Mn₂₀Ni₂₀C₃. Mechanical properties and temperature dependence of yield strength. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*, 2023, vol. 26, no. 6, pp. 5–16. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_5. (In Russian).
17. Qi Y., Cao T., Zong H., Wu Y., He L., Ding X., Jiang F., Jin S., Sha G., Sun J. Enhancement of strength-ductility balance of heavy Ti and Al alloyed FeCoNiCr high-entropy alloys via boron doping. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, vol. 75, pp. 154–166. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.023.
18. Xian X., Zhong Z.-H., Lin L.-J., Zhu Z.-X., Chen C., Wu Y.-C. Tailoring strength and ductility of high-entropy CrMnFeCoNi alloy by adding Al. *Rare Metals*, 2018, vol. 41, pp. 1015–1021. DOI: 10.1007/s12598-018-1161-4.
19. Wang C., Li T.-H., Liao Y.-C., Li C.-L., Jang J.S.-C., Hsueh C.-H. Hardness and strength enhancements of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with Nd doping. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, p. 38192. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138192.
20. Pengjie Z., Shuhuan W., Yukun L., Liansheng C., Kun L., Dingguo Z. Excellent plasticity of C and Mo alloyed TRIP high entropy alloy via rolling and heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, vol. 15, pp. 2145–2151. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.018.

21. Xu J., Duan R., Feng K., Zhang C., Liu P., Li Z. Enhanced strength and plasticity of selective laser melted NbMoTaW refractory high-entropy alloy via carbon microalloying. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4108454.
22. Yang G., Zhao Y., Lee D.-H., Park J.-M., Seok M.-Y., Suh J.-Y., Ramamurty U., Jang J.-I. Influence of hydrogen on incipient plasticity in CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 161, pp. 23–28. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.010.
23. Bai J., Wang Z., Zhang M., Qiao J. Effects of tailoring Zn additions on the microstructural evolution and electrical properties in GaInSnZn high-entropy alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, p. 2201831. DOI: 10.1002/adem.202201831.
24. Huang K., Wang G., Qing H., Chen Y., Guo H. Effect of Cu content on electrical resistivity, mechanical properties and corrosion resistance of AlCuNiTiZr_{0.75} high entropy alloy films. *Vacuum*, 2021, vol. 195, p. 110695. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110695.
25. Feng R., Rao Y., Liu C., Xie X., Yu D., Chen Y., Ghazisaeidi M., Ungar T., Wang H., An K., Liaw P.K. Enhancing fatigue life by ductile-transformable multicomponent B2 precipitates in a high-entropy alloy. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-021-23689-6.
26. Li J., Zuo J., Yu H. Effects of La on thermal stability, phase formation and magnetic properties of Fe-Co-Ni-Si-B-La high entropy alloys. *Metals*, 2021, vol. 11, p. 1907. DOI: 10.3390/met11121907.
27. Gromov V.E., Konovalov S.V., Peregudov O.A., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A. Coatings from high-entropy alloys: state and prospects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65 (10), pp. 683–692. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-10-683-692. (In Russian).
28. Chen Y., Munroe P., Xie Z., Zhang S. High-entropy alloy based coatings: microstructures and properties. *Protective thin coatings technology*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2021, pp. 205–232. DOI: 10.1201/9781003088349-6.
29. Jin G., Cai Z., Guan Y., Cui X., Liu Z., Li Y., Dong M., Zhang D. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 445, pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.03.135.
30. Li F., Cui W., Shao Y., Zhang J., Du S., Chen Z., Tian Z., Chen K., Liu G. Preparing high-entropy ceramic films from high-entropy alloy substrate. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 287, p. 126365. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126365.
31. Li B., Li H., Xia Y., Chen M., Wu Z., Tan X., Xu H. A novel magnetic FeCoNiCuAl high-entropy alloy film with excellent corrosion resistance. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4392421.
32. Lin C., Yao Y. Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys. *Metals*, 2023, vol. 13, p. 205. DOI: 10.3390/met13020205.
33. Yurov V., Guchenko S., Mahanov K. Vysokoentropiinye pokrytiya FeCoCrNiMoTiW i ikh svoistva [FeCoCrNiMoTiW high-entropic coatings and their properties]. *Evrasiiskii soyuz uchenykh. Seriya: Tekhnicheskii i fiziko-matematicheskie nauki = Eurasian Union Scientists. Series: Technical and Physical and Mathematical Sciences*, 2021, no. 6 (87), pp. 12–16. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.87.1386.
34. Yurov V.M., Eremin E.N., Guchenko S. Microhardness and wear resistance of a high-entropy coating FeCrNiTiZrAl. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2182. DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012083.
35. Wang X., Yao H., Yuan L., Chen L., Xu F., Tan Z., He D., Yang Y., Liu Y., Zhou Z. Novel candidate of metal-based thermal barrier coatings: high-entropy alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 474. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.130087.
36. Fu Y., Dai C., Luo H., Li D., Du C., Li X. The corrosion behavior and film properties of Al-containing high-entropy alloys in acidic solutions. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 560. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.149854.
37. Xu Z., Wang Y., Gao X., Peng L., Qiao Q., Xiao J., Guo F., Wang R., Yu J. Electrochemical deposition and corrosion resistance characterization of FeCoNiCr high-entropy alloy coatings. *Coatings*, 2023, vol. 13, p. 1167. DOI: 10.3390/coatings13071167.
38. Chen X., Cui T., He S., Chang W., Shi Y., Lou Y. Effects of ultrasonic shot peening on the corrosion resistance and antibacterial properties of Al_{0.3}Cu_{0.5}CoCrFeNi high-entropy alloys. *Coatings*, 2023, vol. 13, p. 246. DOI: 10.3390/coatings13020246.
39. Liu K., Li X., Wang J., Zhang Y., Guo X., Wu S., Yu H. Investigation of mechanical and corrosion properties of light and high hardness cast AlTiVCrCu_{0.4} high entropy alloy. *Materials Characterization*, 2023, vol. 200. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.112878.



40. Xue L., Ding Y., Pradeep K., Case R., Castaneda H., Paredes M. The grain size effect on corrosion property of $\text{Al}_2\text{Cr}_5\text{Cu}_5\text{Fe}_{53}\text{Ni}_{35}$ high-entropy alloy in marine environment. *Corrosion Science*, 2022, vol. 208. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110625.
41. Zou Y., Li S., Liu S., Li J., Li Y. Improved mechanical and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy with cold rolling and post deformation annealing process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 887. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161416.
42. Li N., Zhang H., Wu L., Li Z., Fu H., Ni D., Xue P., Liu F., Xiao B., Ma Z. Simultaneously increasing mechanical and corrosion properties in CoCrFeNiCu high entropy alloy via friction stir processing with an improved hemispherical convex tool. *Materials Characterization*, 2023, vol. 203. DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113143.
43. Zhang W.-R., Liao W.-B., Liaw P.K., Ren J.-L., Brechtel J., Zhang Y. Effects of transient thermal shock on the microstructures and corrosion properties of a reduced activation high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 918. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165762.
44. Xiong W., Guo A.X., Zhan S., Liu C.T., Cao S.C. Refractory high-entropy alloys: a focused review of preparation methods and properties. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 142, pp. 196–215. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.08.046.
45. Haché M.J., Zou Y., Erb U. Thermal stability of electrodeposited nanostructured high-entropy alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2024, vol. 474, p. 130719. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.130719.
46. Shivam V., Shadangi Y., Basu J., Mukhopadhyay N.K. Alloying behavior and thermal stability of mechanically alloyed nano AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy. *Journal of Materials Research*, 2019, vol. 34, pp. 787–795. DOI: 10.1557/jmr.2019.5.
47. Shahmir H., Nili-Ahmadabadi M., Shafie A., Langdon T. Hardening and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeNiMnTi high-entropy alloy processed by high-pressure torsion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 194. DOI: 10.1088/1757-899X/194/1/012017.
48. Bazlov A.I., Storchko I.V., Zanaeva E.N., Ubivovka E.V., Parkhomenko M.S., Milkova D.A., Bryukhanova V.V. Effect of replacing molybdenum with vanadium on the tendency to amorphization, structure and thermophysical properties of high-entropy alloys of the Fe–Co–Ni–Cr–(Mo,V) system. *Metallurgist*, 2024, vol. 67, pp. 1695–1704. DOI: 10.1007/s11015-024-01664-y. Translated from *Metallurg*, 2023, no. 11, pp. 86–92. DOI: 10.52351/00260827_2023_11_86.
49. Sun H., Liu T., Oka H., Hashimoto N., Cao Y., Luo R. Role of aging temperature on thermal stability of Co-free $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}_{1.3}$ high-entropy alloy: decomposition and embrittlement at intermediate temperatures. *Materials Characterization*, 2024, vol. 210, p. 113804. DOI: 10.1016/j.matchar.2024.113804.
50. Liu X., Bai Z., Ding X., Yao J., Wang L., Su Y., Fan Z., Guo J. A novel lightweight refractory high-entropy alloy with high specific strength and intrinsic deformability. *Materials Letters*, 2020, vol. 287, p. 129255. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.129255.
51. Wei Q., Luo G., Tu R., Zhang J., Shen Q., Cui Y., Gui Y., Chiba A. High-temperature ultra-strength of dual-phase $\text{Re}_{0.5}\text{MoNbW}(\text{TaC})_{0.5}$ high-entropy alloy matrix composite. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 84, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.12.015.
52. Zhang H., Cai J., Geng J., Sun X., Zhao Y., Guo X., Li D. Development of high strength high plasticity refractory high entropy alloy based on Mo element optimization and advanced forming process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, vol. 112. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106163.
53. Panina E.S., Yurchenko N.Yu., Tozhibayev A., Zherebtsov S.V., Stepanov N.D. [High-entropy alloy based on the Co–Mo–Nb–Hf system with high strength at 1000 °C]. *Materialovedenie, formoobrazuyushchie tekhnologii i oborudovanie 2022 (ICMSSTE 2022)* [Materials Science, Shaping Technologies and Equipment 2022 (ICMSSTE 2022)]. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Simferopol, 2022, pp. 128–134. (In Russian).
54. Pan Q., Zhang L., Feng R., Lu Q., An K., Chuang A.C., Poplawsky J.D., Liaw P.K., Lu L. Gradient cell-structured high-entropy alloy with exceptional strength and ductility. *Science*, 2021, vol. 374, pp. 984–989. DOI: 10.1126/science.abj8114.
55. Zhang B., Chen J., Wang P., Sun B., Cao Y. Enhanced strength-ductility of CoCrFeMnNi high-entropy alloy with inverse gradient-grained structure prepared by laser surface heat-treatment technique. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 111, pp. 111–119. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.09.043.
56. Chen Y., Fang Y., Wang R., Tang Y., Bai S., Yu Q. Achieving high strength and ductility in high-entropy alloys via spinodal decomposition-induced compositional heterogeneity. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 141, pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.018.

57. Cai J., Zhang H., Wang L., Sun X., Xu X., Guo X., Li D. Design and coherent strengthening of ultra-high strength refractory high entropy alloys based on laser additive manufacturing. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4469753.
58. Jiang D., Xie L., Wang L. Current application status of multi-scale simulation and machine learning in research on high-entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 26, p. 1341. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.233.
59. Gromov B.E., Konovalov C.B., Chen C., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov B.B. Development vector for enhancement of Cantor HEA properties. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*, 2023, no. 2 (44), pp. 3–12. DOI: 10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12. (In Russian).
60. Klimentov D., Stepanov N., Li J., Fang Q., Zharebtsov S. Machine learning-based strength prediction for refractory high-entropy alloys of the Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr system. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 7213. DOI: 10.3390/ma14237213.
61. Bhandari U., Rafi R., Zhang C., Yang S. Yield strength prediction of high-entropy alloys using machine learning. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 26, p. 101871. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101871.
62. Klimentov D.N., Yurchenko N.Y., Stepanov N.D., Zharebtsov S.V. Prediction of strength characteristics of high-entropy alloys Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr systems. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, p. 1535. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.145.
63. Li J., Fang Q. Investigation into plastic deformation and machining-induced subsurface damage of high-entropy alloys. *Simulation and Experiments of Material-Oriented Ultra-Precision Machining*. Springer, 2019, pp. 23–52. DOI: 10.1007/978-981-13-3335-4_2.
64. Wu C., Li J., Qiu W., Lian F., Huang L., Zhu J., Chen L. Plasticity of CrMnFeCoNi high-entropy alloy via a purification mechanism. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4415770.
65. Hao J., Zhang Y., Wang Q., Ma Y., Sun L., Zhang Z. Enhanced plasticity in a Zr-Rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, vol. 590. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154876.
66. Li H., Cao F., Li T., Tan Y., Chen Y., Wang H., Liaw P.K., Dai L. Enhanced plasticity in refractory high-entropy alloy via multicomponent ceramic nanoparticle. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, vol. 194, pp. 51–62. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.01.030.
67. Chen Y.-Y., Hung S.-B., Wang C.-J., Wei W.-C., Lee J.-W. High temperature electrical properties and oxidation resistance of V-Nb-Mo-Ta-W high entropy alloy thin films. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 375, pp. 854–863. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.080.
68. Nong Z., Zhu J., Yang X., Yu H., Lai Z. Effects of annealing on microstructure, mechanical and electrical properties of AlCrCuFeMnTi high entropy alloy. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 2013, vol. 28, pp. 1196–1200. DOI: 10.1007/s11595-013-0844-9.
69. Uporov S., Ryltsev R., Sidorov V., Estemirova S.K., Sterkhov E., Balyakin I., Chetelkatchev N. Pressure effects on electronic structure and electrical conductivity of TiZrHfNb high-entropy alloy. *Intermetallics*, 2022, vol. 140. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107394.
70. Xie J., Zhang S., Sun Y., Hao Y., An B., Li Q., Wang C.A. Microstructure and mechanical properties of high entropy CrMnFeCoNi alloy processed by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 795, p. 140004. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140004.
71. Karimi M., Shamanian M., Enayati M., Adamzadeh M., Imani M. Fabrication of a novel magnetic high entropy alloy with desirable mechanical properties by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 84, pp. 859–870. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.048.
72. Siddiqui D.N., Mehboob N., Zaman A., Alsuhailani A.M., Algahtani A., Tirth V., Alharthi S., Al-Shaalan N.H., Amin M.A. Effect of Cr-doping on the structural and magnetic properties of mechanically alloyed FeCoNi-AlMnCr high-entropy alloy powder. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, p. 19892. DOI: 10.1021/acsomega.3c01823.
73. Dong Z., Huang S., Ström V., Chai G., Varga L.K., Eriksson O., Vitos L. $\text{Mn}_x\text{Cr}_{0.3}\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.5}\text{Al}_{0.3}$ high entropy alloys for magnetocaloric refrigeration near room temperature. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 79, pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.10.071.
74. Gromov V.E., Shlyarova Y.A., Konovalov S.V., Vorob'ev S.V., Perehudov O.A. Application of high-entropy alloys. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2021, vol. 64, p. 747. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-747-754.
75. Suleimanova I.I., Ivanov M.A., Tingaev A.K., Trofimov E.A. [Prospects for application of high-entropy alloys for engineering at cryogenic temperatures]. *Sbornik trudov X Evraziiskogo simpoziuma po problemam prochnosti i resursa v usloviyakh klimaticheskikh nizkikh temperatur, posvyashchennyi 100-letiyu obrazovaniya YaASSR i 300-letiyu*



Rossiiskoi akademii nauk «EURASTRENCOLD-2022» [Proceedings of the X Eurasian Symposium on Problems of Strength and Lifetime under Climatically Low Temperatures, Dedicated to the 100th Anniversary of the Yakut ASSR and the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences “EURASTRENCOLD-2022”], Yakutsk, September 12–16, 2022. Kirov, 2022, pp. 418–422. (In Russian).

76. Kadyrmetov A.M., Popov D.A., Snyatkov E.V. Perspektivy primeneniya vysokoentropiinykh splavov dlya vosstanovleniya detalei mashin atmosferynym plazmennym napyleniem [Prospects for the use of high-entropy alloys for the restoration of machine parts by atmospheric plasma spraying]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin = World of Transport and Technological Machinery*, 2021, no. 1 (72), pp. 20–27. DOI: 10.33979/2073-7432-2021-72-1-20-27.

77. Pickering E.J., Carruthers A.W., Barron P.J., Middleburgh S.C., Armstrong D.E.J., Gandy A.S. High-entropy alloys for advanced nuclear applications. *Entropy*, 2021, vol. 23, p. 98. DOI: 10.3390/e23010098.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).