



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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






Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода



Зинаида Батаева^{1, а}, Алексей Руктуев^{2, б, *}, Иван Иванов^{2, в}, Александр Юргин^{2, д}, Иван Батаев^{2, е}

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, ул. Щетинкина, 33, г. Новосибирск, 630099, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>,  bataevazb@ngs.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-1325-1533>,  ruktuev@corp.nstu.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0001-5021-0098>,  i.ivanov@corp.nstu.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0003-0473-7627>,  yurgin2012@yandex.ru,

^е  <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>,  i.bataev@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.017.15

История статьи:

Поступила: 03 марта 2021

Рецензирование: 22 марта 2021

Принята к печати: 17 апреля 2021

Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:

Высокоэнтропийные сплавы

Многокомпонентные сплавы

Обзор

Состав

Получение

Пластическая деформация

Кристаллическая структура

Метастабильность

Свойства

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-73-10215 “In-situ исследование эволюции дислокационной структуры пластически деформированных высокоэнтропийных сплавов в условиях действия высоких давлений и температур с применением синхротронного излучения”).

АННОТАЦИЯ

Статья содержит обзор исследований, связанных с разработкой, анализом структуры и свойств высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). **Разработка сплавов на основе энтропийного подхода. Ожидания и современные представления.** Отражены заложенные первоначально принципы создания многокомпонентных сплавов, характеризующихся стабильностью структуры и механических свойств. Отмечено, что представления о роли высокой энтропии смешения в формировании неупорядоченных твердых растворов замещения и подавлении охрупчивающих интерметаллидных фаз со временем были существенно изменены. Полагают, что получение однофазной структуры твердого раствора в настоящее время не является обязательным требованием к разрабатываемым ВЭС. **Состав высокоэнтропийных сплавов.** Отражены примеры разработанных многокомпонентных сплавов различного состава. Отмечается, что одними из наиболее изученных в настоящее время являются сплавы на основе 3d переходных элементов. На примере сплавов этой группы показана возможность обеспечения как высоких, так и низких значений показателей прочности и пластичности. **Методы получения высокоэнтропийных сплавов.** Перечислены методы получения высокоэнтропийных сплавов. Отмечается, что чаще всего используют методы, основанные на плавлении исходных материалов и последующей их кристаллизации. Приведены примеры работ, в которых использованы технические решения, основанные на методах порошковой металлургии, магнетронного распыления мишеней, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, спиннингования, диффузионной сварки. **Структура высокоэнтропийных сплавов.** Приведены сведения о высокоэнтропийных сплавах, характеризующихся многофазным строением, присутствием мелкодисперсных, в том числе наноразмерных выделений. Отмечены работы, в которых высокоэнтропийные сплавы были получены в виде металлических стекол, металлоподобных соединений, карбидов, оксидов, боридов. Представлены результаты анализа ряда факторов, которые, по мнению исследователей, способны влиять на структурное состояние создаваемых многокомпонентных сплавов. Отмечается неоднозначность суждений, сформулированных различными группами специалистов. **Свойства высокоэнтропийных сплавов. Пластическая деформация ВЭС.** Приведены работы по изменению структуры и свойств ВЭС методами термопластического воздействия. **Методы изучения высокоэнтропийных сплавов.** Представлен перечень методов исследования, наиболее часто используемых при работе с ВЭС. Для структурных исследований используют методы просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа, световой микроскопии. Дан краткий анализ подходов к оценке свойств сплавов. **Назначение высокоэнтропийных сплавов.** Описаны перспективные области применения ВЭС. Отмечается возможность использования сплавов в ракетно-космической отрасли, самолето- и машиностроении, атомной энергетике, устройствах СВЧ, акустоэлектронике. **Русскоязычные публикации в области ВЭС.** Даны ссылки на публикации отечественных специалистов. Отмечены диссертационные работы, выполненные в российских научных и образовательных организациях.

Для цитирования: Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З.Б. Батаева, А.А. Руктуев, И.В. Иванов, А.Б. Юргин, И.А. Батаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 116–146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

*Адрес для переписки

Руктуев Алексей Александрович, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: ruktuev@corp.nstu.ru

Разработка сплавов на основе энтропийного подхода Ожидания и современные представления

Первые работы, связанные с созданием и исследованием высокоэнтропийных сплавов, были выполнены в конце XX века. Американский патент на материалы этого типа на имя тайваньского ученого J.-W. Yeh зарегистрирован в 2002 году [1]. В 2004 году были опубликованы работы J.W. Yeh с соавторами [2] и B. Cantor с соавторами [3], широко цитируемые в настоящее время. Таким образом, примерно 20 лет назад появился новый класс материалов, получивший название «высокоэнтропийные сплавы» (ВЭС) [2, 3- 6]. В состав этих сплавов входит от 5 до 13 элементов примерно в эквиатомном или эквимольном соотношении [2, 7]. Содержание каждого элемента в ВЭС составляет от 5 до 35 %. Об уровне интереса, который вызывает новое направление материаловедения, свидетельствует тот факт, что за столь короткое время анализу высокоэнтропийных сплавов было посвящено более 5000 значимых работ. Среди них могут быть выделены публикации, содержащие обзор проблем, связанных с особенностями получения, исследования, структуры и свойств многокомпонентных сплавов [8–17]. Интерес, проявляемый по отношению к высокоэнтропийным сплавам, был обусловлен привлекательным комплексом их свойств, в том числе прочностью, пластичностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью [2, 18, 19].

В отличие от традиционных сплавов, например сталей, латуней, бронз, алюминиевых или титановых сплавов, у высокоэнтропийных сплавов отсутствует понятие «основной» либо «матричный» компонент. Все присутствующие в эквиатомных соотношениях элементы являются основными, поскольку в неупорядоченном твердом растворе каждый из элементов системы имеет одинаковую вероятность присутствия в каком-либо из узлов кристаллической решетки [20]. Следовательно, в высокоэнтропийных сплавах со структурой твердого раствора деление компонентов на основные и дополнительные (легирующие) сделать нельзя. По сути, эквиатомные сплавы располагаются в центральных областях многокомпонентных диаграмм состояния.

В связи с тем что из совокупности компонентов, присутствующих в значительных количествах, какой-либо из них нельзя выделить в качестве базового, иногда анализируемые многокомпонентные сплавы называют безосновными (не имеющими основы), или композиционно-сложными [21].

Недостаточное внимание к разработке эквиатомных сплавов, содержащих пять и более компонентов, и доминирование в прежние годы принципа разработки материалов на основе какой-либо из металлических матриц объяснялось ожиданием образования в многокомпонентных смесях хрупких интерметаллических соединений и формирования сложных по строению фаз. Таким образом, можно говорить об использовании в течение последних двух десятилетий «энтропийного» подхода к конструированию сплавов [22]. Одна из основных идей разработки ВЭС заключалась в получении однофазной структуры в виде неупорядоченного твердого раствора замещения. Полагали, что присутствие фаз с упорядоченной структурой, в том числе интерметаллидов различного состава, приведет к охрупчиванию материала, состоящего из различных компонентов.

Характерной особенностью многокомпонентных сплавов является высокая энтропия смешения, снижающая склонность к образованию в сплавах интерметаллидов и способствующая образованию однофазных растворов замещения с ОЦК- или ГЦК-структурой. Высокая энтропия смешения рассматривается как мера вероятности сохранения структуры и фазового состава сплавов, обеспечения их термической стабильности, сохранения высоких значений механических, физических и химических свойств [23, 24]. Энтропия сплава определяется величиной четырех составляющих – конфигурационной энтропии смешения ($\Delta S_{\text{конф}}$), энтропией колебания атомов (ΔS_v), энтропией движения электронов (ΔS_e) и энтропией магнитных моментов (ΔS_m) [11].

Концепция разработки ВЭС основана на том, что в многокомпонентных сплавах конфигурационная энтропия характеризуется высоким уровнем, не типичным для традиционных материалов [2, 25, 26]. По сравнению с конфигурационной энтропией вклад составляющих ΔS_v , ΔS_m и ΔS_e в ВЭС мал. Таким образом, наименование

«высокоэнтропийные сплавы» связывают с повышенной конфигурационной составляющей энтропии.

О переходе системы из нестабильного состояния в более стабильное свидетельствует снижение энергии Гиббса. Увеличение количества элементов системы, приводящее к росту конфигурационной энтропии, является фактором, способствующим снижению энергии Гиббса. При этом снижается склонность системы к образованию фаз в виде упорядоченных твердых растворов и интерметаллидов и повышается вероятность образования неупорядоченных твердых растворов [26].

Множество исследований в анализируемой области было связано с поиском параметров, определяющих условия формирования высокоэнтропийных сплавов, предсказанием их структурно-фазового состояния. В работе В.Ф. Горбаня с соавторами проведен анализ более 200 высокоэнтропийных сплавов, на основе которого были сделаны выводы о взаимосвязи между электронной концентрацией, фазовым составом, параметрами решетки и свойствами твердых растворов с решетками ОЦК и ГЦК типа [27]. В качестве основного фактора, определяющего характер фазообразования в эквивалентных высокоэнтропийных сплавах, была выделена усредненная атомная концентрация (эл/ат.). Полученные данные позволили авторам исследования сформулировать условия формирования высокоэнтропийных химических соединений (фазы Лавеса, σ -фазы, μ -фазы). Отмечается, что 100 %-я σ -фаза возникает в тех сплавах, в которых фазу этого типа образуют все пары входящих в них элементов. Вторым необходимым условием является величина электронной концентрации в диапазоне 6,7...7,3 эл/ат. 100 %-я высокоэнтропийная фаза Лавеса, по представлениям авторов отмеченной работы, возникает при суммарной отрицательной энтальпии смешения сплавов равной либо ниже -7 кДж/моль. При этом в сплаве должны присутствовать два элемента с энтальпией смешения менее -30 кДж/моль, а усредненная электронная концентрация должна находиться в диапазоне 6...7 эл/ат. Отмечается, что зародыши твердой фазы в высокоэнтропийном сплаве формируются на базе наиболее тугоплавкого элемента [27].

В работе С.А. Фирстова с соавторами на примере ряда ВЭС проведен анализ связи электронной концентрации с типом кристаллической решетки твердого раствора [23]. Отмечается, что при концентрации до 4 эл/ат. образуется пластичный твердый раствор на базе решетки ГПУ типа. Диапазону концентраций от 4,25 до 7,2 эл/ат. соответствует один или несколько типов твердых растворов на основе ОЦК-решетки. В диапазоне электронной концентрации 7,2...8,3 эл/ат. формируются двухфазные твердые растворы с ОЦК- и ГЦК-решетками. Сплавам с решеткой ГЦК соответствует электронная концентрация, превышающая значение 8,4 эл/ат. Для них характерно такое важное свойство как пластичность. Анализ результатов, представленных в анализируемой статье, позволяет сделать вывод о том, что хрупкие ВЭС обладают преимущественно решеткой ОЦК-типа и соответствуют диапазону электронной концентрации $\sim 5,5...7,5$ эл/ат.

В то же время следует отметить неоднозначность суждений о роли различных факторов, которые потенциально могли бы влиять на формирование высокоэнтропийных сплавов, определять их структурное состояние. На основании анализа ряда факторов, характерных для разнородных атомов, входящих в многокомпонентные системы, таких как атомные радиусы, значения валентности, электроотрицательности, типы кристаллических структур элементарных металлических компонентов, энтальпийный критерий, А.С. Рогачев сделал вывод о том, что основным критерием возможности образования высокоэнтропийных сплавов является близость размеров составляющих их атомов [17]. Роль других факторов, по его мнению, менее значима, что согласуется с выводами, сделанными ранее в ряде других работ.

Таким образом, многочисленные попытки выявить факторы, определяющие фазовый состав и детали тонкого строения высокоэнтропийных сплавов, к формулированию надежных, четко обоснованных выводов не привели. Пользуясь обсуждаемыми в литературе критериями, предсказать безошибочно структуру вновь разрабатываемых ВЭС и степень ее стабильности при термическом и термопластическом воздействии не представляется возможным. Большинство конкретных выводов и заключений о строении ВЭС сделано по результатам экспери-

ментальных исследований. На примере системы CoCrFeNi показано, что структура сплавов, полученных при добавлении в них таких элементов, как марганец, алюминий или ванадий, существенно отличается. Так, например, введение в сплав алюминия приводит к формированию многофазной структуры [28]. При соблюдении определенных условий для системы CoCrFeNiV также характерно присутствие нескольких фаз [29]. Следует подчеркнуть, что информация о строении ВЭС, считавшихся изученными, постоянно корректируется и дополняется новыми данными.

В своем обзоре [17] А.С. Рогачев в качестве предшественников высокоэнтروпийных сплавов отмечает объемные аморфные сплавы (bulk amorphous alloys, металлические стекла), которые, как и ВЭС, могут содержать широкий набор компонентов. Материалы обоих типов принципиально отличаются степенью стабильности структуры. Металлическое стекло представляет собой метастабильную фазу, атомы которой на стадии охлаждения не успевают перестроиться и сформировать структуру кристаллического типа. Метастабильность аморфной фазы проявляется в том, что при нагреве материала и выполнении определенных температурно-временных условий атомы перестраиваются с формированием кристаллической структуры. В однофазных ВЭС разнородные атомы на стадии охлаждения расплава случайным образом располагаются в узлах кристаллической решетки (ГПУ, ОЦК или ГЦК) и образуют, таким образом, разупорядоченный твердый раствор замещения. По степени стабильности ВЭС, решетки которых существенно искажены из-за соседства различных по размеру атомов, занимают промежуточное положение между металлическими стеклами и стабильными фазами, характеризующимися малой плотностью дефектов кристаллического строения [17].

Активно анализируются многокомпонентные высокоэнтропийные сплавы, характеризующиеся сложным многофазным строением [30]. Экспериментально установлено, что в сплаве CrFeNiCoAlCu может быть образовано более шести фаз [31], часть из которых является наноразмерными. К ним могут быть отнесены сплавы, содержащие аморфную фазу [32], а также смеси интерметаллидных фаз [33].

Состав высокоэнтропийных сплавов

Общее число элементов, входящих в различные семейства высокоэнтропийных сплавов, составляет около 40. Сочетание в сплавах пяти-двадцати компонентов дает возможность получения огромного числа высокоэнтропийных сплавов [10, 34]. Отмечается, что реально изучено всего лишь около пятисот материалов, относящихся к семейству ВЭС [11, 17]. Стратегия выбора состава ВЭС определяется множеством факторов, важнейшие из которых связаны с условиями эксплуатации материала [26].

Сплавы на основе 3d переходных элементов являются одними из наиболее изученных в настоящее время ВЭС. В каждый из них входит, по крайней мере, 4 из 9 элементов: Fe, Co, Cr, Ni, Mn, Al, Ti, Cu, V [2, 3, 15, 35]. Интерес к материалам этого семейства был обусловлен такими их качествами, как высокая твердость, положительный температурный коэффициент упрочнения, высокие значения износо- и коррозионной стойкости [2, 5, 18, 30, 36, 37]. Хорошо известным и часто обсуждаемым пятикомпонентным ВЭС является сплав CoCrFeMnNi, предложенный научному сообществу в 2004 году [3]. В литературе этот однофазный материал со структурой неупорядоченного твердого раствора замещения именуется иногда сплавом Кантора или «канторовским сплавом». Одним из наиболее изученных материалов, относящихся к классу высокоэнтропийных сплавов, является AlCoCrCuFeNi [2, 7, 30, 38, 39]. Кроме 3d переходных элементов в состав полиметаллических ВЭС входят и другие элементы, например цирконий: AlTiVFeNiZr, AlTiVFeNiZrCoCr, CuTiVFeNiZrCoCr, MoTiVFeNiZrCo, MoTiVFeNiZrCoCr, CuTiVFeNiZrCo и др. [1].

Большой объем исследований связан со сплавами на основе тугоплавких металлов (Hf, Ta, Mo, Nb, V, W, Cr, Zr, Ti). В третью группу ВЭС, которой уделяется повышенное внимание специалистов, входят легкие сплавы (Al, Sn, Be, Li, Mg, Ti, Sc, Si, Zn). Во все перечисленные многокомпонентные материалы входят алюминий и титан [17]. Четвертое семейство ВЭС основано на использовании переходных 4f-металлов (редкоземельные элементы Gd, Dy, Lu, Tm, Tb, Y). Выделяют также пятое (Cu, Al, Mn, Ni, Zn, Sn) и шестое (Au, Ag, Cu, Co, Cr, Ni, Pt, Pd, Ru, Rh)

семейство ВЭС, в которые могут входить такие элементы, как Fe, Co, Ni, Si, B, Zr, Hf, Cu, Be, Mo, Cr. Не вызывает сомнений, что номенклатура ВЭС будет расширяться.

В качестве самостоятельного семейства ВЭС выделяют также высокоэнтروпийные металлические стекла. В последние годы внимание специалистов уделяется разработке высокоэнтропийных металлоподобных соединений [11, 17]. В их число входят керамические материалы в виде карбидов [40], оксидов [41], боридов [42], нитридов [43]. Примерами соединений такого рода являются $(\text{TiZrNbHfTa})\text{C}$, $(\text{AlCrTaTiZr})\text{O}_x$, $(\text{Ti}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2})\text{B}_2$, $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_x$. Говоря об оксидных материалах [44], отмечают простые оксидные системы, образованные двух- и трехвалентными металлами, а также высокоэнтропийные системы со структурой перовскита [45] и шпинели [46].

В литературе приведены примеры композиций, в которых матричными материалами являются ВЭС, полученные методом механического сплавления чистых компонентов (CoCrFeNiMn , CoCrFeNiV , CoCrFeNiCu , CoCrFeNiAl), а упрочнение обеспечивают керамические частицы (WC , TiB_2 , $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$) [17, 47–49].

С учетом основных компонентов, входящих в высокоэнтропийные сплавы, последние условно делят на несколько групп [17]. Так, например, выделяют высокоэнтропийные стали, жаропрочные сплавы, легкие сплавы, редкоземельные сплавы, бронзы и латуни, катализаторы. Подчеркивают, однако, что такой тип классификации не является общепризнанным.

Методы получения высокоэнтропийных сплавов

Для получения сплавов, характеризующихся высокой энтропией смешения, могут быть использованы различные технические решения, 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.

В большинстве случаев высокоэнтропийные сплавы получают плавлением материалов с по-

следующей их кристаллизацией [17]. Используют методы электродугового плавления в вакууме [2, 5, 6, 50–52], аргонодугового [53] и индукционного [3, 54] плавления, плавления в печах сопротивления. Одним из наиболее распространенных методов получения ВЭС является вакуумно-дуговое плавление [55, 56]. Исходным материалом является смесь металлов чистотой более 99 %. Выплавку сплавов выполняют в среде инертного газа, предотвращающего материал от окисления. С целью повышения степени однородности отливок их переплавляют несколько раз. Важным фактором, определяющим выбор метода получения ВЭС, является температура плавления материала и входящих в него компонентов. Для получения тугоплавких ВЭС рациональным является применение технологии электродугового плавления.

С целью формирования оптимальной структуры и улучшения комплекса механических свойств высокоэнтропийные сплавы, полученные методом литья, как правило, подвергают термопластической обработке – прокатке в холодном и горячем состоянии [54, 57, 58], ковке [7], волочению [59]. В качестве окончательной технологической операции обычно используют гомогенизирующий отжиг либо иные способы термической обработки, способствующие формированию равновесной структуры [54, 59, 60].

К часто используемым методам получения ВЭС относят также механическое сплавление чистых порошковых компонентов в планетарных шаровых мельницах [26, 61–67]. Деформированием в высокоэнергетических шаровых мельницах смеси элементарных порошков осуществляют их взаимодействие. Длительность обработки составляет ~ 10...20 часов. Горячее изостатическое прессование является способом компактирования материалов, позволяющим улучшить качество структуры ВЭС [68]. Методом механического сплавления были получены, например, материалы типа CoFeNiXY . Компонентами X в них являются Cr и Cu, а функцию компонентов Y выполняют Mn, Al, Ti или Zn [17].

Частицы износа, оставляемые стальными шарами в процессе обработки порошковых смесей, содержащих железо, на качестве получаемых ВЭС не отражаются. В иных случаях можно ожидать влияние продуктов намола, попавших в многокомпонентные материалы при обработке

их шарами. Особенностью, характерной для механического сплавления порошков высокопластичных материалов, является налипание их на поверхность деформирующих шаров, что в итоге отражается на качестве формируемых ВЭС. Полученные методом механического легирования порошковые материалы требуют консолидации. Одним из наиболее эффективных подходов к выполнению этой задачи служит искровое плазменное спекание (*spark plasma sintering*) [64–66, 69]. В ряде работ многокомпонентные высокоэнтروпийные сплавы получали с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [70, 71].

Высокоэнтропийные сплавы в виде тонких пленок и многослойных покрытий получают методом магнетронного распыления [9, 11, 17, 43, 72]. Тонкослойный ВЭС может быть получен путем распыления одной мишени, в состав которой входит несколько компонентов. Второй подход к решению задачи основан на одновременном магнетронном распылении нескольких мишеней [73]. Методом магнетронного распыления получают высокоэнтропийные сплавы в виде нитридов [74], карбидов [40] и других материалов. Чередую мишени разного состава, методом магнетронного распыления были сформированы также наноструктуры, состоящие из слоев ВЭС и чистых металлов [75].

Одной из разновидностей многокомпонентных сплавов, анализируемых в последнее время, являются высокоэнтропийные металлические стекла [17, 76, 77]. Технологический процесс их получения основан на спиннинговании расплавов ВЭС. Полученное таким образом металлическое стекло представляет собой аморфную ленту, охлажденную с высокой скоростью на вращающемся медном барабане. Одна из технологий ускоренной закалки ВЭС из жидкого состояния основана на использовании *splat*-охлаждения, заключающегося в столкновении капли расплава с внутренней поверхностью вращающегося с высокой скоростью медного цилиндра [78].

В работе [79] изучали возможность получения жаропрочных композитов на основе высокоэнтропийных сплавов FeCoNiMnCr и $\text{FeCoNi}_2\text{MnCrCu}$. Слоистые композиты формировали методом диффузионной сварки алюминиевых фольг и тонких слоев высокоэнтропийных сплавов. Слитки ВЭС, полученные в вакуумно-дуговой

печи, деформировали прокаткой до толщины 0,4 мм на двухвалковых станах при комнатной температуре со степенью $\sim 15\%$ за один проход [79, 80]. Слоистые заготовки сваривали диффузионным методом за два этапа. На первом этапе длительностью 2 ч температура составляла 600°C , на втором – 950°C .

Структура высокоэнтропийных сплавов

Наиболее важные разделы большинства исследований высокоэнтропийных сплавов связаны с изучением их структуры, особенности которой определяют комплекс свойств и область возможного применения анализируемых материалов. Строение высокоэнтропийных сплавов, полученных методом кристаллизации расплава, в значительной степени определяется скоростью охлаждения материала. По данным, представленным в работе [17], процессы кристаллизации ВЭС и традиционных сплавов идентичны. В условиях высокоскоростного охлаждения материалов формируется мелкозернистая структура. В тех случаях, когда расплав охлаждается с невысокой скоростью, составляющей десятки градусов в секунду, образуется структура дендритного типа [81]. При высокоскоростном охлаждении расплава склонность к образованию дендритов исчезает.

На начальном этапе разработки концепции ВЭС широко обсуждалось положение о том, что высокая энтропия смешения, являясь фактором, препятствующим образованию упорядоченных фаз и интерметаллидов, способствует формированию неупорядоченных твердых растворов замещения. Учитывая это, можно было ожидать, что анализ структурных механизмов упрочнения ВЭС не будет представлять собой особо сложную задачу. Однако на этапе разработки многокомпонентных эквиатомных сплавов, характеризующихся многофазным строением, оказалось, что, как и при изучении традиционных легированных сплавов, структурные исследования являются не менее сложной задачей. Для ее решения также необходимо использование самых разнообразных методов исследования. Важнейшими из них являются методы рентгеноструктурного анализа, трансмиссионной и растровой электронной микроскопии. Комплекс привлека-

емых методов исследований определяется решаемыми в работе задачами, составом материала, геометрическими параметрами полученных заготовок и другими особенностями анализируемых ВЭС.

Анализ свойств «классических» однофазных ВЭС проводился с учетом расположения атомов разнородных элементов в объеме кристаллической решетки. Полагают, что находящиеся в многокомпонентной системе атомы, различающиеся размерами, электронным строением, термодинамическими свойствами, приводят к существенному искажению кристаллической решетки твердого раствора, повышению эффективности механизма твердорастворного упрочнения и стабилизации свойств материала [23]. Эта особенность существенно отличает ВЭС от обычных сплавов [20]. В работе [17] на примере пятикомпонентного эквиатомного сплава ABCDE графически показано, что в элементарных ячейках типа ОЦК и ГЦК дальний порядок для атомов каждого типа отсутствует и возникающая фаза представляет собой полностью разупорядоченный твердый раствор замещения. Эквиатомный сплав типа ABCDE может быть построен только из множества элементарных ячеек, отличающихся между собой составом.

Характерными представителями однофазных высокоэнтропийных сплавов, обладающих структурой неупорядоченного твердого раствора замещения с кристаллической решеткой ГЦК типа, являются сплавы CoCrFeNi и CoCrFeNiMn. В диссертационной работе, выполненной Д.Г. Шайсултановым [82], показано, что при добавлении в систему CoCrFeNi ванадия либо ванадия совместно с марганцем в структуре сплавов наряду с ГЦК-фазой формируется тетрагональная σ -фаза. Еще более сложная структура образуется в сплаве, содержащем кроме четырех указанных компонентов алюминий и медь (CoCrFeNiAlCu). В структуре этого сплава зафиксированы четыре фазы, в том числе разупорядоченная ОЦК-фаза (с преимущественным содержанием хрома и железа), упорядоченная B2 фаза (с преимущественным содержанием алюминия и никеля), упорядоченная $L1_2$ фаза (обогащенная медью), упорядоченная $L1_2$ фаза (обогащенная кобальтом, хромом, железом).

Важнейшей характеристикой, определяющей интерес многих специалистов к высоко-

энтропийным сплавам, является стабильность их структуры, а значит, и свойств. Тезис о связи этого качества лишь с высокими значениями конфигурационной составляющей энтропии, характерной для многокомпонентных сплавов, в настоящее время свою актуальность утратил. Во многих работах экспериментально показано, что и в сплавах с высокими значениями энтропии смешения наряду с твердым раствором могут возникать иные фазы, в том числе интерметаллидные.

Посредством использования метода аномального рассеяния рентгеновских лучей и дифракции нейтронов в работе [83] было показано, что двухнедельная выдержка при 753 К четырехкомпонентного сплава FeCoCrNi, полученного методом дуговой плавки, не привела к проявлению эффекта упорядочения твердого раствора и формированию в нем дальнего порядка. Такую стабильность анализируемого сплава связывают с его высокой конфигурационной энтропией.

Вопрос о стабильности ВЭС в условиях термического и термопластического воздействия остается открытым. Подробный анализ этой проблемы представлен в работе А.С. Рогачева [17]. Большой объем исследований связан с оценкой стабильности пятикомпонентного сплава CoCrFeNiMn (сплава Кантора). Диаметр атомов марганца в нем (0,274 нм) существенно больше по сравнению с атомами, входящими в четырехкомпонентную систему CoCrFeNi. По этой причине максимальные искажения кристаллической решетки, локализованные вблизи атомов марганца, в пятикомпонентной системе существенно выше, чем в сплаве CoCrFeNi. Анализ поведения сплава Кантора в различных условиях термического и термопластического воздействия не дает оснований сформулировать однозначные выводы о его стабильности. В литературе имеются данные о длительном сохранении однофазной структуры материала в широком диапазоне температур (1273...1473 К), что свидетельствует о его высокой стабильности [29, 84–86]. В то же время на основании результатов экспериментальных исследований сделаны выводы о том, что пластическая деформация и высокотемпературное воздействие являются факторами, приводящими к выделению из сплава CoCrFeNiMn вторичных фаз [17, 50, 85, 87, 88],

в том числе наноразмерных интерметаллидов типа NiMn, FeCo.

Увеличение доли хрома и марганца ускоряет образование вторичных фаз. При этом отмечается [17], что при выделении из высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn какой-либо вторичной фазы его матричная фаза остается твердым раствором с ГЦК-структурой. Система CoCrFeNiAl, как и CoCrFeNiMn, характеризуется метастабильностью. В результате непродолжительного отжига этого типа ВЭС в нем возникает несколько типов структурных составляющих [89].

Анализ структуры термически и пластически обработанных сплавов, состоящих из тугоплавких компонентов (TiZrTaHf, TiZrTaNb, TiZrHfNbV), свидетельствует о том, что так же, как и многие другие ВЭС, их можно отнести к метастабильным материалам [90–93]. Учитывая изложенное, А.С. Рогачев делает вывод о том, что большинство высокоэнтропийных сплавов содержат несколько фаз, количество которых в результате отжига увеличивается [17]. К числу стабильных или ограниченно стабильных ВЭС отнесены: CoFeNiMnCu [94], AlNbTiVZr_x [95], CoCrFeNiMnTi_{0.1} [96], ZrTiHfCuNiFe [97] и ряд других. При этом следует иметь в виду, что оценка степени стабильности ВЭС во многих случаях представляет собой методически сложную задачу. Речь идет, например, о наблюдении особо дисперсных фаз, объемная доля которых в сплавах мала. Вполне вероятно, что при выполнении структурного анализа какие-либо из них могут быть упущены.

Следует отметить, что понятие «метастабильности», находящееся в противоречии с исходными свойствами высокоэнтропийных сплавов и выражающееся в формировании в них нескольких фаз, предлагается не рассматривать в качестве принципиального недостатка реальных многокомпонентных систем. Положительный эффект, обусловленный их присутствием, может быть связан с проявлением эффекта дисперсионного упрочнения материалов [17]. При этом во избежание охрупчивания ВЭС стремятся предотвращать образование в них σ -фаз.

Представленный в работе [17] анализ структурных преобразований в сплавах, отнесенных к семейству высокоэнтропийных, позволил сделать вывод о сложности интерпретации явлений, связанных со стабильностью многокомпонент-

ных систем. Полагают, что связь стабильности анализируемых материалов лишь с уровнем конфигурационной энтропии является весьма упрощенной. Более обоснованный подход к решению этой проблемы связывают с развитием полуэмпирических критериев стабильности ВЭС, проведением квантовомеханических расчетов [98–100], термодинамическим анализом многокомпонентных систем.

Как и следовало ожидать, менее стабильными являются интенсивно деформированные сплавы, а также сплавы с измельченной зеренной структурой [101]. Задачи, решаемые М.В. Ивченко, при выполнении им диссертационной работы были связаны с изучением структуры и свойств высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNiCu [102]. Особый интерес представляют полученные экспериментально данные о структурно-фазовых преобразованиях, происходящих в быстрозакаленном спиннинговании и сплэтингом расплаве, о влиянии межапластической деформации и термическом воздействии на структуру и фазовый состав сплава AlCrFeCoNiCu.

При охлаждении со скоростью 10 К/с в сплаве AlCrFeCoNiCu формируется сложная по составу структура дендритного типа, каждая из фаз которой является шестикомпонентной. Выделившиеся в пределах дендритов и в междендритном пространстве фазы равномерно распределены по объему слитка, являются наноразмерными, характеризуются равноосной и пластинчатой морфологией, являются упорядоченными (структурные типы B2 и L1₂) и неупорядоченными (A1, A2) твердыми растворами [102]. Высокоскоростное охлаждение расплава по методу сплэтинга ($\sim 10^6$ К/с), как и при спиннинговании ($\sim 10^5$ К/с), приводит к формированию ультрамелкозернистой (560 нм) структуры бездендритного типа, в которой содержатся наноразмерные шестикомпонентные фазы.

Одна из особенностей, зафиксированных при исследовании шестикомпонентных сплавов AlCrFeCoNiCu после высокоскоростной закалки и интенсивной пластической деформации, заключается в присутствии распределенных в объеме фаз локальных наносегрегаций из некоторых элементов. Результатом соответствующего переупорядочивания компонентов сплава служит проявление размерно-пространственной периодичности

элементного и фазового состава в объеме слитка [102]. Методом 3D-AP томографии в сплаве AlCrFeCoNiCu зафиксированы концентрационные флуктуации в виде кластеров в диапазоне размеров от одного до нескольких десятков нанометров.

Дислокационные механизмы упрочнения высокоэнтروпийных сплавов изучены гораздо в меньшей степени, чем классических легированных сталей и сплавов. Тем не менее во многих работах этой проблеме уделяется особое внимание. В качестве основных рассматривают твердорастворный механизм упрочнения, упрочнение границами зерен, скоплениями дислокаций, а также дисперсными фазами.

Одна из задач, решаемых в работе [21], была связана с изучением структуры и свойств сплава CoCrFeMnNi, легированного углеродом и алюминием. Установлено, что введение 0,7 ат. % C и 3,4 ат. % Al сопровождается ростом энергии дефекта упаковки сплава и замедлением процесса двойникования на начальных этапах деформации. Высокие прочностные свойства деформированного на 80 % сплава CoCrFeMnN(Al,C) по сравнению с эквивалентным пятикомпонентным сплавом CoCrFeMnNi обусловлены большим вкладом твердорастворного упрочнения в присутствии легирующих элементов – углерода и алюминия. Установлено, что в отожженном после холодной прокатки ($\varepsilon = 80\%$) сплаве CoCrFeMnN(Al,C) наиболее значимым является зернограничное упрочнение. Влияние наноразмерных карбидов, возникших в процессе отжига при 700...900 °C холоднокатаного сплава, соизмеримо с механизмом зернограничного упрочнения.

Свойства высокоэнтропийных сплавов

Основным фактором, определяющим интерес специалистов к разрабатываемым материалам, является характер их поведения в различных условиях воздействия внешней среды. Комплекс параметров, зафиксированных на начальных этапах разработки ВЭС, а также ожидания, основанные на теоретических представлениях о возможных проявлениях многокомпонентных систем, позволяют сделать вывод о перспективности их использования в различных отраслях

производства. Учитывая, что анализируемые в литературе высокоэнтропийные сплавы представляют собой семейство существенно различающихся по составу материалов, в каждом конкретном случае необходимо оценивать комплекс свойств, соответствующих их назначению и условиям эксплуатации. Свойства ВЭС определяются входящими в их состав компонентами, структурным состоянием и технологией производства.

В литературе содержится широкий спектр представлений (иногда противоречивых) о свойствах высокоэнтропийных сплавов. В качестве важных показателей ВЭС отмечают их твердость, прочность, износостойкость [2, 7, 102, 103], повышенную пластичность при низких температурах, коррозионную стойкость, термическую стабильность [17], устойчивость к ионизирующим излучениям [22, 104]. Следует подчеркнуть, что такого рода характеристика является обобщенной и ко всем типам ВЭС не может быть применима. Для материалов конструкционного назначения особое значение имеет сочетание прочностных свойств, показателей пластичности, трещиностойкости и ряда других характеристик, определяющих поведение сплавов в тяжелых условиях внешнего нагружения.

Уникальные свойства многокомпонентных ВЭС обусловлены проявлением четырех эффектов [17, 9–13]. Один из них связан с высокой энтропией сплава, второй – с искажениями кристаллической решетки, третий – с замедленной диффузией компонентов сплава. Четвертый получил название «коктейльный эффект».

Эффект высокой энтропии, от которого происходит название анализируемых в работе сплавов, определяется уровнем конфигурационной энтропии. В соответствии с одной из классификаций анализируемых сплавов к низкоэнтропийным относят сплавы, у которых $\Delta S_{\text{mix}} \leq 0,69R$, где R – универсальная газовая постоянная. Среднеэнтропийные сплавы описываются соотношением $0,69R \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 1,61R$. К высокоэнтропийным относят сплавы с $\Delta S_{\text{mix}} \geq 1,61R$ [4]. Поиск составов высокоэнтропийных стабильных сплавов осложняется рядом обстоятельств [17]. Одно из них заключается в том, что применимость зависимостей, надежно описывающих условия стабильности идеальных растворов, по отношению к реальным твердым растворам неочевидна [11].

Второй из основных эффектов высокоэнтропийных сплавов – эффект искажений кристаллической решетки. Обусловлен он различием размеров атомов, из которых состоит многокомпонентная система. Степень искажений минимальна при соседстве атомов, близких по своим размерам. В сплавах, состоящих из атомов, существенно различающихся по размерам, формируются более крупные пустоты – междоузлия. В этих пустотах могут располагаться внедренные атомы, формирующие область локальных напряжений [17]. Источниками искажений являются также крупные атомы, расположенные в узлах кристаллической решетки и окруженные более мелкими атомами, положение которых также соответствует узлам решетки. Искращения кристаллической решетки в значительной степени определяют уровень прочностных свойств ВЭС.

Замедленная диффузия представляет собой третий эффект, определяющий стабильность структуры и комплекс свойств высокоэнтропийных сплавов. Благоприятное влияние низкой скорости диффузии отражается в повышении термической и химической стабильности ВЭС [105, 106]. В качестве факторов, объясняющих торможение диффузионных процессов, отмечают искажения кристаллической решетки и иные особенности, характерные для ВЭС [4, 6, 37, 107]. Вскрытые в ряде работ противоречия позволяют сделать вывод, что подтверждение или опровержение эффекта замедленной диффузии в ВЭС требует дополнительных исследований [17].

Термин «коктейльный эффект» предполагает, что в сложной по составу системе проявляется эффект смешения, не доступный каждому из его компонентов в отдельности. По сути, этот термин является синонимом такого понятия, как синергетический эффект.

Из всей совокупности механических свойств ВЭС в большей степени внимание специалистов уделялось показателям прочности. В то же время принципиальное значение имеет вопрос о хрупкости высокоэнтропийных сплавов, степень которой определяется пластичностью, ударной вязкостью и трещиностойкостью материалов. Следует подчеркнуть, что отсутствие охрупчивающих фаз является одним из отличительных требований к ВЭС, определяющих их технологические свойства, в частности, деформируемость

при обработке давлением в холодном состоянии. С учетом этих представлений полагают, что высокая энтропия смешения, препятствующая формированию в ВЭС интерметаллидных фаз и способствующая образованию преимущественно неупорядоченных твердых растворов замещения, является фактором, благоприятно отражающимся на сочетании прочностных свойств и склонности их к деформации [26, 7, 108–110]. Совокупность показателей прочности и пластичности позволяет в первом приближении оценить перспективы разрабатываемых материалов в качестве конструкционных.

Анализ свойств ВЭС в различных условиях внешнего воздействия описан во многих работах [8, 9, 11, 13, 15, 35, 111]. Наибольший объем информации связан с системами на основе 3d-переходных металлов. Уровень прочностных свойств некоторых из них можно определить, как высокий [17]. В соответствии с данными, представленными в работе [112], величина этого показателя для сплава $\text{Co}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{50}\text{V}_{10}$ достигает 2000 МПа. При этом уровень деформации ε , соответствующий разрушению материала, достигает 71 %.

Имеющие структуру ГЦК твердого раствора отливки из высокоэнтропийного сплава CoCrFeNiMn являются высокопластичными ($\delta = 68\%$) и обладают при этом низким уровнем прочностных свойств ($\sigma_{0,2} = 140$ МПа, $\sigma_B = 443$ МПа) [82]. Аналогичные выводы автор работы сделал относительно четырехкомпонентного сплава CoCrFeNi . В отличие от марганца, введение которого на прочностных свойствах и пластичности четырехкомпонентной системы существенно не отражается, роль ванадия, приводящего к формированию хрупкой σ -фазы, в снижении пластичности сплавов CoCrFeNiV и CoCrFeNiMnV весьма заметна. Легированные ванадием сплавы проявляют заметную пластичность лишь при воздействии сжимающих напряжений. Низкий уровень пластичности (0,2 %) характерен также для сплавов CoCrFeNiAlCu с многофазной структурой при комнатной температуре.

Термическая стабильность ВЭС предполагает сохранение структуры разупорядоченного твердого раствора при нагреве материала и выдержке его в высокотемпературном состоянии. Результатом упорядочения твердого раствора в

процессе отжига ВЭС, заключающегося в диффузионном перераспределении атомов с фиксацией их в определенных термодинамически выгодных позициях элементарной ячейки, может быть формирование сверхструктуры [17]. Обсуждались попытки изучения перестройки структуры твердого раствора в процессе его нагрева и контроля ее методами дифракции рентгеновского излучения. Решение этой задачи, имеющее значение с прикладной и фундаментальной точки зрения, методически проблематично.

Высокоэнтропийные сплавы рассматривают в качестве перспективных жаропрочных материалов [26, 113, 114]. В работе [24] изучали термическую стабильность сверхтвердых нитридных покрытий на основе пятикомпонентного высокоэнтропийного сплава, содержащего Ti, V, Zr, Nb, Hf. Объектами исследования являлись тонкие покрытия, полученные методом вакуумно-дугового испарения предварительно подготовленного многокомпонентного катода. Подложками служили пластины из хромоникелевой аустенитной стали. Для нитридных покрытий (TiVZrNbHf)N, полученных в присутствии азота (0,27...0,66 Па) при подаче на стальную пластину постоянного отрицательного потенциала, характерны высокие значения твердости (50...60 ГПа). Такой уровень свойств материалов объясняется формированием поликристаллической структуры с размером зерен ~30...50 нм и значительными по величине искажениями кристаллической решетки. Проведенные в работе исследования свидетельствуют о высокой термической стабильности однофазных нитридных покрытий. Их структура сохраняется при отжиге до 1100 °С [24]. Выводы о достаточно высокой термической стабильности в интервале температур от 20 до 1000 °С были сделаны С.А. Фирстовым с соавторами на основании экспериментальных исследований девяти высокоэнтропийных сплавов [115].

В работе [82] была изучена возможность создания новых композиционных материалов путем диффузионной сварки пластин из ВЭС типа FeCoNiMnCr и FeCoNi₂MnCrCu и алюминиевого сплава системы Al-Si. Установлено, что диффузионные процессы, происходившие при нагреве слоистых пакетов, привели к формированию неоднородных по строению материалов

с образованием переходных зон, дендритных построений, интерметаллических фаз. Предел прочности композита, полученного методом диффузионной сварки под давлением, стабилен на уровне ~615 МПа в температурном диапазоне 20 – 850 °С. При этом предел прочности пластин ВЭС при 750 °С вне композита не превышал 375 МПа.

Пятикомпонентный аморфный сплав TiZrHfCuNi, полученный путем разлива расплава в охлаждаемую медную изложницу, приобретая высокий уровень предела прочности (1930 МПа), при комнатной температуре имеет пластичность, близкую к нулевым показателям [116]. Методом магнетронного распыления была получена тонкая пленка из шестикомпонентного сплава AlCrMoTaTiZr, характеризующаяся высокими значениями модуля упругости (11,2 ГПа) и твердости (193 ГПа) [117].

В работе М.В. Карпеца с соавторами [102] представлены результаты оценки поведения высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi_x (где $x = 1,0; 1,5; 2,0$) при трении о не жестко закрепленные частицы абразива. После аргонодуговой плавки в структуре сплава был зафиксирован твердый раствор с решеткой типа ГЦК и σ -фазы, аналогичная тетрагональной σ -фазе бинарного сплава Fe-Cr. С ростом содержания никеля объемная доля σ -фазы уменьшалась. Из трех исследованных высокоэнтропийных материалов наиболее высоким уровнем износостойкости обладает сплав VCrMnFeCoNi₁. Его коэффициент относительной износостойкости ($K = 3,03$), измеренный в соответствии с ГОСТ 3647–80, близок к значению материала, наплавленного электродом Т-590 ($K = 3,09$), который применяют для поверхностного упрочнения изделий, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания. Таким образом, можно сделать вывод о высокой абразивной износостойкости высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi₁, предложенного в работе [103].

В работе [23] на примере высокоэнтропийного сплава VNbTaCrMoW сделан вывод о том, что материал приобретает усредненные значения большинства физических характеристик. Исключение составляют лишь прочностные свойства, которые у ВЭС, благодаря аномальным значениям твердорастворного упрочнения, существенно выше [118, 119].

Пластическая деформация ВЭС

Наряду с термической обработкой пластическая деформация рассматривается в качестве одного из эффективных технологических факторов, позволяющих изменять структуру, показатели прочности, пластичности и другие свойства высокоэнтропийных сплавов. В настоящее время нет оснований утверждать, что потенциальные возможности такого подхода очевидны и могут быть применимы к большинству анализируемых материалов. В то же время при изучении ряда полиметаллических сплавов получены убедительные доказательства эффективности способов обработки металлов давлением. Так, например, после холодной прокатки со степенью 80 % сплав CoCrFeMnN(Al,C) обладает высоким комплексом механических свойств: $\sigma_{0,2} = 870$ МПа, $\sigma_b = 1060$ МПа, $\delta = 25$ % [21]. Результатом горячей пластической деформации сплава CoCrFeNiMnV является изменение его фазового состава и преобразование исходной lamellarной структуры в ультрамелкозернистую, что благоприятно отражается на свойствах материала, в частности, приводит к снижению температуры вязкохрупкого перехода [82].

Исследования, ориентированные на восполнение пробелов в области пластического и термопластического воздействия, успешно выполняются в Белгородском государственном национальном исследовательском университете под руководством Г.А. Салищева. Одна из задач, решаемых в диссертационной работе Д.Г. Шайсултанова, была связана с разработкой режимов деформации, обеспечивающих повышение комплекса механических свойств сплавов CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAlCu [82]. Экспериментально установлено, что при комнатной температуре заготовки из сплава CoCrFeNiMn могут быть продеформированы методом одноосновной прокатки без потери сплошности материала на десятки процентов. В результате такого воздействия предел текучести сплава увеличился в 8 раз (с 140 до 1120 МПа), а предел прочности – в 2,7 раза (с 443 до 1175 МПа). Как и следовало ожидать, уровень относительного удлинения при этом существенно снизился (с 68 до 14 %).

Анализ влияния прокатки в холодном состоянии на структуру и свойства сплава $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ выполнен в работе [120]. Зафиксированное экс-

периментально повышение твердости сплавов по сравнению с литым состоянием обусловлено проявлением механизмов деформационного упрочнения. В частности, на основании результатов, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии, установлено, что повышение прочностных свойств материалов связано с формированием многочисленных построений в виде нанодвойников. С увеличением степени пластической деформации объемная доля этих дефектов кристаллического строения возрастает. В работе [82] роль процессов дислокационного скольжения и двойникования в формировании прочностных свойств показана на примере холоднокатанного сплава CoCrFeNiMn [82].

Диссертационная работа М.В. Климовой связана с изучением влияния деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы $\text{Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Al,C)}$ [21]. Внимания заслуживает выявленная экспериментально стадийность микроструктуры сплава CoCrFeMnNi в процессе его прокатки при комнатной температуре. Автор работы выделяет три стадии структурных преобразований, связанных со степенью пластической деформации материала: увеличение плотности дислокаций ($\epsilon = 5 \dots 20$ %); интенсивное деформационное двойникование ($\epsilon = 20 \dots 60$ %); образование полос сдвига ($\epsilon = 60 \dots 80$ %). В области криогенных температур (-196 °C) стадия двойникования сдвигается к меньшим значениям степени деформации.

После мегапластической деформации по схеме кручения под высоким давлением (6 ГПа) микротвердость сплава AlCrFeCoNiCu достигает 12 ГПа [102]. В этих условиях растворяются все избыточные фазы и развивается механоиндуцированное ОЦК \rightarrow ГЦК превращение. Последующий отжиг сплава приводит к обратному ГЦК \rightarrow ОЦК преобразованию структуры.

Плохая деформируемость при комнатной температуре является фактором, ограничивающим применение некоторых высокоэнтропийных сплавов [2, 7, 121]. Так, например, в работе [7] отмечается низкий комплекс механических свойств отливок из сплава AlCoCrCuFeNi . В качестве решения указанной проблемы было предложено использовать метод всесторонней горячейковки ($a-b-c$ -ковки) при температуре 950 °C. Сплав

получали методом индукционной плавки с последующим электрошлаковым переплавом и литьем в медную охлаждаемую изложницу. Ковку осуществляли в изотермическом штамповом блоке на гидравлическом прессе при скорости перемещения траверсы 1 мм/с. Общая степень деформации составила $\sim 1000\%$. В процессе всестороннейковки устраняется дендритное строение литого сплава, структура ВЭС становится более мелкой (2,1 мкм) и однородной. Результатом структурных преобразований, сопровождающих горячую пластическую деформацию сплава, является рост предела текучести от 790 до 1170 МПа. Наблюдаемый в этих условиях рост относительного удлинения (с 0,2 до 1 %) не позволяет говорить о существенном улучшении показателей пластичности [122]. Одна из особенностей поведения ковкого сплава Al-CoCrCuFeNi, зафиксированная авторами работы [7], заключается в проявлении эффекта сверхпластичности в области высоких температур (800...1000 °C). При деформации со скоростью 10^{-2} с^{-1} величина относительного удлинения подвергнутых растяжению образцов составляет 1240 % [82].

Методы изучения высокоэнтропийных сплавов

Выбор методов изучения структуры и свойств высокоэнтропийных сплавов обусловлен различными факторами, в том числе особенностями строения материалов, условиями их эксплуатации, размерами образцов. Один из наиболее важных методов исследований связан с рентгеноструктурным анализом сплавов, выявлением присутствующих фаз, определением параметров их кристаллических решеток. Во многих работах в области ВЭС структурные исследования выполнены с применением методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа, световой микроскопии.

Методы механических и иных испытаний определяются назначением разрабатываемых высокоэнтропийных сплавов. Для конструкционных сплавов важнейшее значение имеет информация о прочностных свойствах в условиях одноосного растяжения и сжатия. Уровень надежности и долговечности изделий, изготов-

ленных из ВЭС, связан с такими свойствами материалов, как ударная вязкость, статическая и усталостная трещиностойкость. В ряде случаев важное значение имеют характеристики коррозионной стойкости.

Задачи, связанные с исследованием наноразмерных частиц, выделяющихся в ВЭС, предполагают использование методов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения [123]. В работе [124] для решения такого рода задач при изучении деформированного сплава CoCrFeNiMn использовали метод малоуглового рассеяния синхротронного излучения.

В работе [125] для изучения структурно-фазового состояния четырехкомпонентного сплава CoCrFeNi использовали метод, основанный на дифракции нейтронов. Полученные таким образом экспериментальные результаты позволили сделать заключение об особенностях тонкого строения сплава CoCrFeNiMn [84]. С использованием метода аномального рассеяния рентгеновских лучей и дифракции нейтронов изучали процессы структурных преобразований при нагреве четырехкомпонентного сплава FeCoCrNi, полученного методом дуговой плавки. Было показано [83], что двухнедельная выдержка сплава при 753 К не привела к проявлению эффекта упорядочения твердого раствора и формирования в нем дальнего порядка.

Одной из наиболее важных характеристик многокомпонентных сплавов является степень упорядочения структуры. В работе М.В. Ивченко для прецизионного исследования локального атомного состава шестикомпонентного сплава AlCoCrCuFeNi был использован оптический томографический атомный зонд Cameca atom probe (3D-AP) [18, 102]. Этим же методом изучали структуру и свойства шестикомпонентного сплава AlCrFeCoNiCu после литья и быстрой заковки из расплава [36].

Традиционный подход к обоснованию составов многокомпонентных систем и анализу их свойств связан с высокой трудоемкостью исследований, проведением множества экспериментов. Одна из задач, типичных для анализируемых материалов, связана с необходимостью моделирования фазовых диаграмм состояния. Примеры ее решения методом CALPHAD (Calculations of PHase Diagrams) приведены в работах [126, 127]. Развитие компьютерных техноло-

гий и специального программного обеспечения во многих случаях позволяет существенно сократить затраты на разработку высокоэнтروпийных сплавов. Методами математического моделирования с использованием термодинамических расчетов были проведены исследования по выбору рациональных составов ВЭС [128, 129]. Нет сомнений, что в ближайшие годы этот подход будет одним из наиболее перспективных при обосновании ВЭС различного назначения.

Назначение высокоэнтропийных сплавов

Свойства, характерные для различных типов ВЭС, дают основание считать эти материалы перспективными для применения в ракетно-космической отрасли, самолето- и машиностроении, атомной энергетике [9, 14, 36, 78, 104]. Предпринимаются попытки разработать ВЭС, характеризующиеся высоким уровнем жаропрочности [26]. В соответствии с результатами работы [130] некоторые ВЭС могут выполнять функцию радиационно-стойких покрытий, наносимых на оболочки тепловыделяющих элементов. Одно из приложений аморфных ВЭС связано с формированием на их основе высокотемпературных диффузионных барьеров между медью и кремнием [131]. Обсуждаются возможности использования высокоэнтропийных оксидных системы в электронике, магнитооптике, устройствах СВЧ, акустоэлектронике [44]. Некоторые из разработанных ВЭС характеризуются высокой коррозионной стойкостью и могут использоваться в качестве функциональных покрытий.

Одно из направлений развития ВЭС связано с разработкой сплавов, способных эксплуатироваться при повышенных нагрузках в высокотемпературном состоянии [2, 26]. Речь идет в первую очередь о материалах для современной авиационной промышленности. В диапазоне температур 800...1600 °С предел текучести высокоэнтропийного сплава VNbMoWTa выше, чем суперсплавов Haynes 230 и Inconel 718 [19]. Возможность использования ВЭС в качестве высокотемпературных материалов обсуждалась в работах [19, 23, 26, 130, 132–135]. Одним из основных недостатков ВЭС на основе тугоплавких металлов является высокая плотность, ограничивающая их практическое применение

в качестве жаропрочных материалов. При этом специалисты ВИАМ полагают, что имеются основания для повышения пластичности жаропрочных ВЭС за счет расширения номенклатуры элементов и формирования в материалах упрочняющих фаз.

Среди положительных качеств, характерных для эквивалентного сплава CoCrFeMnNi, заслуживает внимания его высокий уровень вязкости разрушения, составляющий $200 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [136]. Повышение прочностных свойств и пластичности указанного материала при охлаждении до криогенной температуры [58, 136] делает его привлекательным для изготовления оборудования ответственного назначения, предназначенного для эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В работах Д.А. Винника с соавторами [44, 137, 138] анализируются поликомпонентные оксидные фазы, обладающие высокими значениями конфигурационной энтропии смешения. Относящиеся к ним гексаферриты со структурой магнетоплюмбита рассматриваются в качестве материалов для изготовления постоянных магнитов, а также устройств, предназначенных для хранения и перезаписи информации высокой плотности. Основными факторами, объясняющими возможность широкого применения гексаферритов в магнитооптике, устройствах СВЧ, акустоэлектронике, являются высокие значения их твердости, температуры Кюри, коэрцитивной силы, показатели химической инертности [44]. В работах [139, 140] было показано, что гексаферриты, в состав которых входит более одного элемента, замещающего железо, могут отличаться частотой ферромагнитного резонанса и пропускной способностью. Таким образом, варьируя состав материала, можно плавно изменять уровень отмеченных выше свойств.

Русскоязычные публикации в области ВЭС

Исследований в области высокоэнтропийных сплавов, опубликованных на русском языке, относительно мало. Наиболее подробный обзор работ в области ВЭС, опубликованный в Российской Федерации, был выполнен А.С. Рогачевым и представлен в 2020 году в журнале «Физика металлов и металловедение» [17]. В нем отраже-

ны наиболее важные первоисточники, связанные с разработкой многокомпонентных эквиатомных сплавов, а также проведен анализ исследований, выполненных в 2017–2020 годах. Одна из поставленных автором задач заключалась в выявлении степени соотношения между конъюнктурностью концепции ВЭС и перспективностью этих сплавов как объектов, соответствующих «новой парадигме науки о материалах».

Внимания заслуживают работы В.Ф. Башева и А.И. Кушнерева [22, 78], С.А. Фирстова, М.И. Карпова, В.Ф. Горбаня, Н.А. Крапивки и др. [23, 24, 27, 103, 115], В.М. Надутова, С.Ю. Макаренко, П.Ю. Волосевич [51], В.Г. Пушина, М.В. Ивченко, Н.И. Коурова с соавторами [31, 36, 141], О.А. Чиковой, В.В. Вьюхина с соавторами [142–145], Г.А. Салищева, Д.Г. Шайсултанова, А.В. Кузнецова с соавторами [60, 122], Н.А. Кочетова, А.С. Рогачева с соавторами [65], В.Н. Санина, В.И. Юхвида с соавторами [71], И.И. Горбачева, В.В. Попова с соавторами [146], Н.Н. Трофименко с соавторами [26], Д.А. Винника с соавторами [44, 138].

Русскоязычным специалистам будут полезны также обзоры работ в виде первых разделов диссертационных исследований, выполненных в Белгородском государственном национальном исследовательском университете Д.Г. Шайсултановым [82], М.В. Климовой [21], Ю.Н. Юрченко [147], а также в Институте физики металлов УрО РАН М.В. Ивченко [102].

Закключение

Отрасль материаловедения, ориентированную на изучение структуры и свойств многокомпонентных систем, элементы которых присутствуют в эквиатомных или близких к ним соотношениях, можно определить как новую, интенсивно развивающуюся. Принципы, лежащие в основе формирования структуры многокомпонентных эквиатомных сплавов, кардинально отличаются от подходов, которые ранее были использованы при разработке иных типов металлических материалов.

Сформулированная первоначально концепция создания высокоэнтروпийных сплавов, в соответствии с которой высокая энтропия смешения обеспечивает формирование неупорядоченных твердых растворов замещения и

подавляет образование интерметаллидов и упорядоченных фаз, претерпела принципиальные изменения. Проведенные позднее экспериментальные исследования показали, что высокий уровень энтропии смешения не является определяющим критерием структурообразования в многокомпонентных сплавах. При этом получение однофазной структуры твердого раствора в настоящее время не является обязательным требованием к разрабатываемым ВЭС.

Представленные в литературе данные о строении многокомпонентных ВЭС, критериях их стабильности, влиянии параметров обработки на структуру и комплекс свойств неоднозначны.

На основании многочисленных исследований многокомпонентных сплавов не предложен какой-либо универсальный параметр и не выявлено сочетание нескольких параметров, с учетом которых можно было бы с высокой степенью надежности прогнозировать строение, а следовательно, и свойства материалов. Точное предсказание фазового состава высокоэнтропийных сплавов в настоящее время не достигается ни одним из имеющихся в распоряжении специалистов подходов или методов.

Список литературы

1. Patent US 20020159914 A1 US. High-entropy multielement alloys / Yeh J.-W. – N 10/133495; publ. date 31.10.2002.
2. 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.
3. 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.
4. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie-Science des Materiaux*. – 2006. – Vol. 31. – P. 633–648. – DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
5. High-entropy alloys – a new era of exploitation / J.-W. Yeh, Y.-L. Chen, S.-J. Lin, S.-K. Chen // *Materials Science Forum*. – 2007. – Vol. 560. – P. 1–9. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements / J.-W. Yeh, S.-K. Chen, J.-Y. Gan, S.-J. Lin, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang // *Metallur-*



gical and Materials Transactions: A. – 2004. – Vol. 35. – P. 2533–2536. – DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.

7. Влияние микроструктуры на механические свойства при растяжении высокоэнтروпийного сплава AlCoCrCuFeNi / А.В. Кузнецов, Г.А. Салищев, О.Н. Сеньков, Н.Д. Степанов, Д.Г. Шайсултанов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика. – 2012. – № 11. – С. 191–205.

8. Zhang Y. High-entropy materials: a brief introduction. – Singapore: Springer Nature, 2019. – 159 p. – ISBN 978-981-13-8526-1.

9. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu // Progress in Materials Science. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–93. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.

10. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. – 2014. – Vol. 16 (9). – P. 4749–4768. – DOI: 10.3390/e16094749.

11. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 122. – P. 448–511. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.

12. High-entropy alloys: fundamentals and applications / ed. by M.C. Gao, J.-W. Yeh, P.K. Liaw, Y. Zhang. – Cham: Springer International Publishing, 2016. – 524 p. – ISBN 978-3-319-27013-5.

13. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // Science China Materials. – 2018. – Vol. 61 (1). – P. 2–22. – DOI: 10.1007/s40843-017-9195-8.

14. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. High entropy alloys. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – 218 p. – ISBN 9780128002513.

15. High-entropy alloys / B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan, P.P. Bhattacharjee. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 374 p. – ISBN 978-0-12-816067-1.

16. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // Nature Reviews Materials. – 2019. – Vol. 4. – P. 515–534. – DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.

17. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 8. – С. 807–841. – DOI: 10.31857/S0015323020080094.

18. Decomposition in multi-component Al-CoCrCuFeNi high-entropy alloy / S. Singh, N. Wanderka, U. Glatzel, J. Banhart // Acta Materialia. – 2011. – Vol. 59. – P. 182–190. – DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.

19. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys / O.N. Senkov, G.B. Wilks, J.M. Scott, D.B. Miracle // Intermetallics. – 2011. – Vol. 11. – P. 698–706. – DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.

20. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys / Y. Zhang, Y.J. Zhou, J.P. Lin, G.L. Chen, P.K. Liaw // Advanced Engineering Materials. – 2018. – Vol. 10 (6). – P. 534–538. – DOI: 10.1002/adem.200700240.

21. Климова М.В. Влияние деформационно-термической обработки на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Al,C): дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Екатеринбург, 2019. – 151 с.

22. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства высокоэнтропийного сплава CoCrCuFeNiSn_x // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 7. – С. 737–741. – DOI: 10.7868/S0015323014040020.

23. Новый класс материалов – высокоэнтропийные сплавы и покрытия / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Э.П. Печковский // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, № 4-2. – С. 1938–1940.

24. Термостабильность сверхтвердых нитридных покрытий на основе многокомпонентного высокоэнтропийного сплава системы TiVZrNbHf / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.И. Даниленко, М.В. Карпец, А.А. Андреев, Е.С. Макаренко // Порошковая металлургия. – 2013. – № 9/10. – С. 93–102.

25. Oates W.A. Configurational entropies of mixing in solid alloys // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2007. – Vol. 28. – P. 79–89. – DOI: 10.1007/s11669-006-9008-3.

26. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 5. – С. 3–8.

27. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А. Высокоэнтропийные сплавы – электронная концентрация – фазовый состав – параметр решетки – свойства // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 10. – С. 1017–1029. – DOI: 10.7868/S0015323017080058.

28. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy / A. Manzoni, H. Daoud, R. Volk, U. Glatzel, N. Wanderka // Ultramicroscopy. – 2013. – Vol. 163. – P. 184–189. – DOI: 10.1016/j.ultramicro.2012.12.015.

29. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys / F. Otto, Y. Yang, H. Bei, George E.P. // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61 (7). – P. 2628–2638. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.042.

30. Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements / C.-J. Tong, Y.-L. Chen, J.-W. Yeh, S.-J. Lin, S.-K. Chen, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang //

Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2005. – Vol. 36. – P. 881–893. – DOI: 10.1007/s11661-005-0283-0.

31. Особенности микроструктуры литых высокоэнтروпийных сплавов AlCrFeCoNiCu / М.И. Ивченко, В.Г. Пушин, А.Н. Укусников, Н. Вандерка // Физика металлов и материаловедение. – 2013. – Т. 114, № 6. – С. 561–568. – DOI: 10.7868/S0015323013060065.

32. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter / A. Takeuchi, N. Chen, T. Wada, Y. Yokoyama, H. Kato, A. Inoue, J.W. Yeh // Intermetallics. – 2011. – Vol. 19 (10). – P. 1546–1554. – DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.030.

33. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMox alloys // Materials Characterization. – 2012. – Vol. 70. – P. 63–67. – DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.005.

34. Cantor B. Stable and metastable multicomponent alloys // Annales de Chimie Science des Matériaux. – 2007. – Vol. 32 (3). – P. 245–256. – DOI: 10.3166/acsm.32.245-256.

35. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review // Materials Research Letters. – 2014. – Vol. 2 (3). – P. 107–123. – DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.

36. Ивченко М.В., Пушин В.Г., Вандерка Н. Высокоэнтропийные эквивалентные сплавы AlCrFeCoNiCu: гипотезы и экспериментальные факты // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 2. – С. 57–69.

37. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system / C.C. Tung, J.W. Yeh, T.T. Shun, S.-K. Chen, Y.-S. Huang, H.-C. Chen // Materials Letters. – 2007. – Vol. 61 (1). – P. 1–5. – DOI: 10.1016/j.matlet.2006.03.140.

38. Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy / L.H. Wen, H.C. Kou, J.S. Li, H. Chang, X.Y. Hue, L. Zhou // Intermetallics. – 2009. – Vol. 17 (4). – P. 266–269. – DOI: 10.1016/j.intermet.2008.08.012.

39. Mechanical performance of the Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements / C.-J. Tong, M.-R. Chen, J.-W. Yeh, S.-J. Lin, S.-K. Chen, T.-T. Shun, S.-Y. Chang // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2005. – Vol. 36 (5). – P. 1263–1271. – DOI: 10.1007/s11661-005-0218-9.

40. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa) C hard coatings / V. Braic, A. Vladescu, M. Balaceanu, C.R. Luculescu, M. Braic // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 211. – P. 117–121. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.09.033.

41. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)O_x films / M.I. Lin, M.H. Tsai, W.H. Shen, J.W. Yeh // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518. – P. 2732–2737. – DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.142.

42. Dense and pure high-entropy metal diboride ceramics sintered from self-synthesized powders via borothermal reduction approach / J. Gu, J. Zou, S.-K. Sun, H. Wang, S.-Y. Yu, J. Zhang, W. Wang, Z. Fu // Science China Materials. – 2019. – Vol. 62 (12). – P. 1898–1909. – DOI: 10.1007/s40843-019-9469-4.

43. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)N_x multi-component coatings / S.Y. Chang, S.Y. Lin, Y.C. Huang, S.L. Wu // Surface and Coatings Technology. – 2010. – Vol. 204 (20). – P. 3307–3314. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.041.

44. Твердофазный синтез высокоэнтропийных кристаллов со структурой магнетоплюмбита в системе BaO-Fe₂O₃-TiO₂-Al₂O₃-In₂O₃-Ga₂O₃-Cr₂O₃ / Д.А. Винник, Е.А. Трофимов, В.Е. Живулин, О.В. Зайцева, А.Ю. Стариков, Т.А. Жильцова, Ю.Д. Савина, С.А. Гудкова, Д.А. Жеребцов, Д.А. Попова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2019. – Т. 11, № 3. – С. 32–39. – DOI: 10.14529/chem190304.

45. New class of high-entropy perovskite oxides / S. Jiang, T. Hu, J. Gild, N. Zhou, J. Nie, M. Qin, T. Harrington, K. Vecchio, J.A. Luo // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 142. – P. 116–120. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.040.

46. Synthesis and microstructure of the (Co,Cr,Fe,Mn,Ni)₃O₄ high entropy oxide characterized by spinel structure / J. Dabrova, M. Stygar, A. Mikula, A. Knapik, M. Danielewski, K. Mroczka, W. Tejchman, M. Martin // Materials Letters. – 2018. – Vol. 216. – P. 32–36. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148.

47. Fabrication and characterization of WC-HEA cemented carbide based on the CoCrFeNiMn high entropy alloy / I.L. Velo, F.J. Gotor, M.D. Alcalá, C. Real, J.M. Córdoba // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 746. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.292.

48. Development of Ti(C, N)-based cermets with (Co, Fe, Ni)-based high entropy alloys as binder phase / A.G. De la Oja, M.J. Sayagues, E. Chicardi, F.J. Gotor // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 814. – Art. 152218. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152218.

49. Microstructure and properties of Ti(C, N)-TiB₂-FeCoCrNiAl high-entropy alloys composite cermets / Z. Li, X. Liu, K. Guo, H. Wang, B. Cai, F. Chang, C. Hong, P. Dai // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 767. – Art. 138427. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138427.

50. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation / B. Schuh, F. Mendez-Martin, B. Völker, E.P. George, H. Clemens, R. Pippan, A. Hohenwarter // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 96. – P. 258–268. – DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.025.

51. Надуттов В.М., Макаренко С.Ю., Волосевич П.Ю. Влияние алюминия на тонкую структуру и распределение химических элементов в высокоэнтропийных сплавах $\text{Al}_x\text{FeNiCoCuCr}$ // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 5. – С. 467–472. – DOI: 10.7868/S0015323015030092.

52. The microstructure and mechanical properties of novel Al-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys with trimodal distributions of coherent B2 precipitates / L.J. Zhang, K. Guo, H. Tang, M.D. Zhang, J.T. Fan, P. Cui, Y.M. Ma, P.F. Yu, G. Li // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 757. – P. 160–171. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.104.

53. Особенности фазообразования и формирования структуры в высокоэнтропийных сплавах системы AlCrFeCoNiCu_x ($x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0$) / Н.А. Крапивка, С.А. Фирстов, М.В. Карпец, А.Н. Мысливченко, В.Ф. Горбань // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116, № 5. – С. 496–504. – DOI: 10.7868/S0015323015030080.

54. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment / J. Gu, S. Ni, Y. Liu, M. Song // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 755. – P. 289–294. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.025.

55. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy / O.N. Senkov, J.M. Scott, S.V. Senkova, F. Meisenkothen, D.B. Miracle, C.F. Woodward // Journal of Materials Science. – 2012. – Vol. 47. – P. 4062–4074. – DOI: 10.1007/s10853-012-6260-2.

56. Tang W.-Y., Yeh J.-W. Effect of aluminum content on plasma-nitrided $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloys // Metallurgical and Materials Transactions: A. – 2009. – Vol. 40. – P. 1479–1486. – DOI: 10.1007/s11661-009-9821-5.

57. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys // Intermetallics. – 2013. – Vol. 39. – P. 74–78. – DOI: 10.1016/j.intermet.2013.03.018.

58. The influence of temperature and microstructure on tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy / F. Otto, A. Dlouhy, Ch. Somsen, H. Bei, G. Eggeler, E.P. George // Acta Metallurgica. – 2013. – Vol. 61. – P. 5743–5755. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.06.018.

59. Microstructure and mechanical properties of cold drawing CoCrFeMnNi high entropy alloy / X. Ma, J. Chen, X. Wang, Y. Hu, Y. Hue // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 795. – P. 45–53. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.296.

60. Влияние термической обработки на структуру и твердость высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV_x ($x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) / Д.Г. Шайсултанов, Н.Д. Степанов, Г.А. Салищев, М.А. Тихоновский // Физика металлов и металловедение. –

2017. – Т. 118, № 6. – С. 610–621. – DOI: 10.7868/S0015323017060080.

61. Nanocrystalline CoCrFeNiCuAl high-entropy solid solution synthesized by mechanical alloying / K.B. Zhang, Z.Y. Fu, J.Y. Zhang, J. Shi, W.M. Wang, H. Wang, Y.C. Wang, Q.J. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 485, № 1–2. – P. L31–L34. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.05.144.

62. Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNiCrCo_{0.3}Al_{0.7} high entropy alloy / W.P. Chen, Z.Q. Fu, S.C. Fang, H.Q. Xiao, D.Z. Zhu // Materials and Design. – 2013. – Vol. 51. – P. 854–860. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.061.

63. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering / W. Ji, W. Wang, H. Wang, J. Zhang, Y. Wang, F. Zhang, Z. Fu // Intermetallics. – 2015. – Vol. 56. – P. 24–27. – DOI: 10.1016/j.intermet.2014.08.008.

64. Microstructure and mechanical properties of Ni_{1.5}Co_{1.5}CrFeTi_{0.5} high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering / I. Moravcik, J. Cizek, J. Zapletal, Z. Kavasova, J. Vesely, P. Minarik, M. Kitzmantel, E. Neubauer, I. Dlouhy // Materials and Design. – 2017. – Vol. 119. – P. 141–150. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.036.

65. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала / Н.А. Кочетов, А.С. Рогачев, А.С. Щукин, С.Г. Вадченко, И.Д. Ковалев // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2018. – № 2. – С. 35–42. – DOI: 10.17073/1997-308X-2018-2-35-42.

66. Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering / F. Prusa, A. Senkova, V. Kusera, J. Capek, D. Vojtech // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 734. – P. 341–352. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.08.014.

67. Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized Fe-CoNiCrMn high entropy alloy / M.D. Alcalá, C. Real, I. Fombella, I. Trigo, J.M. Cordoba // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 749. – P. 834–843. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.358.

68. Hot consolidation and mechanical properties of nanocrystalline equiatomic AlFeTiCrZnCu high entropy alloy after mechanical alloying / S. Varalakshmi, G.A. Rao, M. Kamaraj, B.S. Murty // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 45. – P. 5158–5163. – DOI: 10.1007/s10853-010-4246-5.

69. TiZrNiCuAl and TiNbNiCuAl alloys by thermal explosion and high-energy ball milling / S.G. Vad-

- chenko, A.S. Rogachev, D.Yu. Kovalev, I.D. Kovalev, N.I. Mukhina // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2019. – Vol. 28 (2). – P. 137–142. – DOI: 10.3103/S1061386219020122.
70. *Рогачев А.С., Мукасян А.С.* Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. – М.: Физматлит, 2012. – 398 с. – ISBN 978-5-9221-1441-7.
71. СВС-металлургия литых высокоэнтروпийных сплавов на основе переходных металлов / В.Н. Санин, В.И. Юхвид, Д.М. Икорников, Д.Е. Андреев, Н.В. Сачкова, М.И. Алымов // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 470, № 4. – С. 421–426. – DOI: 10.7868/S0869565216280124.
72. Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of $(\text{Al}_{1.5}\text{CrNb}_{0.5}\text{Si}_{0.5}\text{Ti})\text{N}_x$ coatings / W.J. Shen, M.-H. Tsai, Y.-S. Chang, J.-W. Yeh // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 520. – P. 6183–6188. – DOI: 10.1016/j.tsf.2012.06.002.
73. *Dolique V., Thomann A.L., Brault P.* High-entropy alloys deposited by magnetron sputtering // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – Vol. 39 (11). – P. 2478–2479. – DOI: 10.1109/TPS.2011.2157942.
74. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component $(\text{AlCrMoSiTi})\text{N}$ coatings / H.W. Chang, P.K. Huang, J.W. Yeh, A. Davison, C.H. Tsau, C.C. Yang // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 3360–3366. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.014.
75. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable monolayer thickness / Z.H. Cao, Y.J. Ma, Y.P. Cai, G.J. Wang, X.K. Meng // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 173. – P. 149–153. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.08.018.
76. Soft magnetic $\text{Fe}_{26.7}\text{Co}_{26.7}\text{Ni}_{26.6}\text{Si}_9\text{B}_{11}$ high entropy metallic glass with good bending ductility / R. Wei, J. Tao, H. Sun, C. Chen, G.W. Sun, F.S. Li // Materials Letters. – 2017. – Vol. 197. – P. 87–89. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.159.
77. Strong metallic glass: TiZrHfCuNiBe high entropy alloy / Y. Tong, J.C. Qiao, J.M. Pelletier, Y. Yao // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 820. – Art. 153119. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153119.
78. *Башиев В.Ф., Кушнерев А.И.* Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si // Физика металлов и материаловедение. – 2017. – Т. 118, № 1. – С. 42–50. – DOI: 10.7868/S001532301610003X.
79. Структура и механические свойства жаропрочного композита на основе высокоэнтропийного сплава / С.А. Фирстов, М.И. Карпов, В.Ф. Горбань, В.П. Коржов, Н.А. Крапивка, Т.С. Строганова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – Т. 81, № 6. – С. 28–33.
80. Структура и свойства слоистого композита из высокоэнтропийного сплава с карбидным и интерметаллидным упрочнением / С.А. Фирстов, М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Т.С. Строганова // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 9. – С. 1267–1275. – DOI: 10.7868/S0367676515090057.
81. *Gaspar H., Özcan A.* New eutectic high-entropy alloys based on Co-Cr-Fe-Mo-Ni-Al : design, characterization and mechanical properties // Metals and Materials International. – 2020. – Vol. 26. – P. 1152–1167. – DOI: 10.1007/s12540-019-00515-9.
82. *Шайсултанов Д.Г.* Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX ($X=\text{Mn, V, Mn и V, Al и Cu}$): дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Белгород, 2015. – 142 с.
83. Absence of long-range chemical ordering in equimolar FeCoCrNi / M.S. Lucas, G.B. Wilks, L. Mauger, J.A. Munoz, O.N. Senkov, E. Michel, J. Horwath, S.L. Semiatin, M.B. Stone, D.L. Abernathy, E. Karapetrova // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100 (25). – Art. 251907. – DOI: 10.1063/1.4730327.
84. An assessment of the lattice strain in the CrMn-FeCoNi high-entropy alloy / L.R. Owen, E.J. Pickering, H.Y. Playford, H.J. Stone, M.G. Tucker, N.G. Jones // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 122. – P. 11–18. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.09.032.
85. Microstructure and texture evolution during annealing of equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy / P.P. Bhattacharjee, G.D. Sathiaraj, M. Zaid, J.R. Gatti, C. Lee, C.-W. Tsai, J.-W. Yeh // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 587. – P. 544–552. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.10.237.
86. *Gludowatz B., George E.P., Rithie R.O.* Processing, microstructure and mechanical properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // JOM. – 2015. – Vol. 67 (10). – P. 2262–2270. – DOI: 10.1007/s11837-015-1589-z.
87. Steady state flow of the FeCoNiCrMn high entropy alloy at elevated temperatures / J.Y. He, C. Zhu, D.Q. Zhou, W.H. Liu, T.G. Nieh, Z.P. Li // Intermetallics. – 2014. – Vol. 55. – P. 9–14. – DOI: 10.1016/j.intermet.2014.06.015.
88. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures / F. Otto, A. Dlouhý, K.G. Pradeep, M. Kuběnova, D. Raabec, G. Eggeler, E.P. George // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 112. – P. 40–52. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.04.005.
89. Multi-phase nature of sintered vs. arc-melted $\text{Cr}_x\text{AlFeCoNi}$ high entropy alloys – experimental and theoretical study / J. Cieslac, J. Tobola, J. Przewoznik, K. Berent, U. Dahlborg, J. Cornide, S. Mehraban, N. Lavery, M. Calvo-Dahlborg // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 801. – P. 511–519. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.121.



90. Effect of metastability on non-phase-transformation high-entropy alloys / Y. Tang, R. Wang, S. Li, X. Liu, Y. Ye, L. Zhu, S. Bai, B. Xiao // *Materials and Design*. – 2019. – Vol. 181. – Art. 107928. – DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107928.

91. Novel metastable engineering in single-phase high-entropy alloy / R. Wang, Y. Tang, S. Li, H. Zhang, Y. Ye, L. Zhu, Y. Ai, S. Bai // *Materials and Design*. – 2019. – Vol. 162. – P. 256–262. – DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.052.

92. Thermal stability of the HfNbTiVZr high-entropy alloy / V. Pacheco, G. Lindwall, D. Karlsson, J. Cedervall, S. Fritze, G. Ek, P. Berastegui, M. Sahlberg, U. Jansson // *Inorganic Chemistry*. – 2019. – Vol. 58. – P. 811–820. – DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b02957.

93. Phase segregation discussion in a $\text{Hf}_{25}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{20}\text{Nb}_{15}\text{V}_{10}$ high entropy alloy: the effect of the high melting point element / A. Poulia, E. Georgatis, C. Mathiou, A.E. Karantzalis // *Materials Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 210. – P. 251–258. – DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.09.059.

94. Nanoscale modulated structures by balanced distribution of atoms and mechanical/structural stabilities in CoCuFeMnNi high entropy alloys / S.H. Shim, S.M. Oh, J. Lee, S.-K. Hong, S.I. Hong // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 762. – Art. 138120. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.138120.

95. Effect of Cr and Zr on phase stability of refractory Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr high-entropy alloys / N.Yu. Yurchenko, N.D. Stepanov, A.O. Grigneva, M.V. Michunin, G.A. Salishchev, S.V. Zherebtsov // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 757. – P. 403–414. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.099.

96. Effect of Ti on phase stability and strengthening mechanisms of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy / H. Shahmir, M. Nili-Ahmadabadi, A. Shafiee, M. Andrzejczuk, M. Lewandowska, T.G. Langdon // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 725. – P. 196–206. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.04.014.

97. Phase stability of B2-ordered ZrTiHfCuNiFe high entropy alloy / Y.H. Meng, F.H. Duan, J. Pan, Y. Li // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 111. – Art. 106515. – DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106515.

98. Alloying effect on phase stability, elastic and thermodynamic properties of Nb-Ti-V-Zr high entropy alloy / M. Liao, Y. Liu, L. Min, Z. Lai, T. Han, D. Yang, J. Zhu // *Intermetallics*. – 2018. – Vol. 101. – P. 152–164. – DOI: 10.1016/j.intermet.2018.08.003.

99. Local-ordering mediated configuration stability and elastic properties of aluminum-containing high entropy alloys / S. Qiu, N. Miao, Z. Guo, J. Zhou, Z. Sun // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 110. – Art. 106474. – DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106474.

100. Ikeda Y., Grabowski B., Körmann F. Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicom-

ponent alloys: a comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 147. – P. 464–511. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.019.

101. Phase stability and kinetics of σ -phase precipitation in CrMnFeCoNi high-entropy alloys / G. Laplanche, S. Berglund, C. Reinhart, A. Kostka, F. Fox, E.P. George // *Acta Materialia*. – 2018. – Vol. 161. – P. 338–351. – DOI: 10.1016/j.actamat.2018.09.040.

102. Ивченко М.В. Структура, фазовые превращения и свойства высокоэнтروпийных металлических сплавов на основе AlCrCoNiCu: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. – Екатеринбург, 2015. – 167 с.

103. Влияние содержания никеля на износостойкость литого высокоэнтропийного сплава VCrMnFeCoNi_x / М.В. Карпец, В.Ф. Горбань, О.М. Мысливченко, С.В. Марченко, М.О. Крапивка // *Современная электрометаллургия*. – 2015. – № 1. – С. 56–60. – DOI: 10.15407/sem2015.01.09.

104. Yeh J.-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM*. – 2013. – Vol. 65 (12). – P. 1759–1771. – DOI: 10.1007/s11837-013-0761-6.

105. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCrFeMo0.5Ni high-entropy alloys / C.-Y. Hsu, C.-C. Juan, W.-R. Wang, T.-Sh. Sheu, J.-W. Yeh, S.-K. Chen // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528. – P. 3581–3588. – DOI: 10.1016/j.msea.2011.01.072.

106. Shun T.-T., Hung C.-H., Lee C.-F. Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 493. – P. 105–109. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.12.071.

107. Tsai K.-Y., Tsai M.-H., Yeh J.-W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61. – P. 4847–4897. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.04.058.

108. Microstructure and compressive properties of multicomponent $\text{Al}_x(\text{TiVCrMnFeCoNiCu})_{100-x}$ high-entropy alloys / Y.J. Zhou, Y. Zhang, Y.L. Wang, G.L. Chen // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 454–455. – P. 260–265. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.049.

109. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties / Y.J. Zhou, Y. Zhang, Y.L. Wang, G.L. Chen // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 90. – Art. 181904. – DOI: 10.1063/1.2734517.

110. Effect of addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi_{0.5} solid solution alloy / Y.J. Zhou, Y. Zhang, F.J. Wang, Y.L. Wang, G.L. Chen // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2008. – Vol. 466 (1–2). – P. 201–204. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2007.11.110.

111. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2016. – Vol. 5 (4). – P. 384–393. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.004.
112. Ultrastrong duplex high-entropy alloy with 2 GPa cryogenic strength enabled by an accelerated martensitic transformation / D.G. Kim, Y.H. Jo, J. Yang, W.-M. Choi, H.S. Kim, B.-J. Lee, S.S. Sohn, S. Lee // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 171. – P. 67–72. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.06.026.
113. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 19–36.
114. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения / Е.Н. Каблов, Н.В. Петрушин, И.Л. Светлов, И.М. Демонис // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 36–52.
115. Механические свойства литых многокомпонентных сплавов при высоких температурах / С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Э.П. Печковский, Н.И. Даниленко, М.В. Карпец // *Современные проблемы физического материаловедения*. – 2009. – Вып. 18. – С. 140–147.
116. Bulk glass formation on Ti-Zr-Hf-Cu-M (M=Fe, Co, Ni) alloys / L.Q. Ma, L.M. Wang, T. Zhang, A. Inoue // *Materials Transactions*. – 2002. – Vol. 43. – P. 277–280. – DOI: 10.2320/matertrans.43.277.
117. Structural and mechanical properties of multi-element (AlCrMoTaTiZr)_{Nx} coatings by reactive magnetron sputtering / K.-H. Cheng, C.-H. Lai, S.-J. Lin, J.-W. Yeh // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519. – P. 3185–3190. – DOI: 10.1016/j.tsf.2010.11.034.
118. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy / O.N. Senkov, J.M. Scott, S.V. Senkova, D.B. Miracle, C.F. Woodward // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol. 509. – P. 6043–6048. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.02.171.
119. Твердорастворное упрочнение высокоэнтروпийного сплава AlTiVCrNbMo / С.А. Фирстов, Т.Г. Рогуль, Н.А. Крапивка, С.С. Пономарев, В.Н. Ткач, В.В. Ковыляев, В.Ф. Горбань, М.В. Карпец // *Деформация и разрушение материалов*. – 2013. – № 2. – С. 9–16.
120. Microstructure and mechanical property of as-cast, -homogenized, and -deformed Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys / Y.-F. Kao, T.-J. Chen, S.-K. Chen, J.-W. Yeh // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 488 (1). – P. 57–64. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.08.090.
121. Effect of temperature on mechanical properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi wrought alloy / C.W. Tsai, M.H. Tsai, J.W. Yeh, C.C. Yang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 490 (1–2). – P. 160–165. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.088.
122. Влияние микроструктуры на механические свойства при растяжении высокоэнтропийного сплава AlCoCrCuFeNi / А.В. Кузнецов, Г.А. Салищев, О.Н. Сеньков, Н.Д. Степанов, Д.Г. Шайсултанов // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика*. – 2012. – № 11. – С. 182–186.
123. Phase separation of metastable CoCrFeNi high entropy alloy at intermediate temperatures / F. He, Z. Wang, Q. Wu, J. Wang, C.T. Liu // *Scripta Materialia*. – 2017. – Vol. 126. – P. 15–19. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.08.008.
124. Nano-precipitates in severely deformed and low-temperature aged CoCrFeMnNi high-entropy alloy studied by synchrotron small-angle X-ray scattering / Y.-C. Huang, C.-S. Tsao, S.-K. Wu, C. Lin, C.-H. Chen // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 105. – P. 146–152. – DOI: 10.1016/j.intermet.2018.12.003.
125. Structure of some CoCrFeNi and CoCrFeNiPd multicomponent HEA alloys by diffraction techniques / U. Dahlborg, J. Cornide, M. Calvo-Dahlborg, T.S. Hansen, A. Fitch, Z. Leong, S. Chambréland, R. Goodall // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 681. – P. 330–341. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.248.
126. CALPHAD-aided development of quaternary multi-principal element refractory alloys based on NbTiZr / O.N. Senkov, C. Zhang, A.L. Pilchak, E.J. Payton, C. Woodward, F. Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 783. – P. 729–742. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.325.
127. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications / D.B. Miracle, J.D. Miller, O.N. Senkov, C. Woodward, M.D. Uchic, J. Tiley // *Entropy*. – 2014. – Vol. 16 (1). – P. 494–525. – DOI: 10.3390/e16010494.
128. ICME approach to explore equiatomic and non-equiatomic single phase BCC refractory high entropy alloys / A. Raturi, C.J. Aditya, N.P. Gurao, K. Biswas // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 806. – P. 587–595. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.387.
129. Computational design of light and strong high entropy alloys (HEA): Obtainment of an extremely high specific solid solution hardening / E. Menou F. Tancrét, I. Toda-Caraballo, G. Ramstein, P. Castany, E. Bertrand, N. Gautier, P.E.J. Rivera Diaz-Del-Castillo // *Scripta Materialia*. – 2018. – Vol. 156. – P. 120–123. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.07.024.
130. Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Константинов С.В. Радиационная стойкость высокоэнтропийных наноструктурированных покрытий (Ti, Hf, Zr, V, Nb) N // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85 (10). – С. 105–110.

131. Thermally stable amorphous (AlMoNbSiTa-TiVZr) 50N50 nitride film as diffusion barrier in copper metallization / M.-H. Tsai, C.-W. Wang, C.-H. Lai, J.-W. Yeh, J.-Y. Can // *Applied Physics Letters*. – 2008. – Vol. 92. – Art. 052109. – DOI: 10.1063/1.2841810.

132. Microstructure and mechanical properties of refractory MoNbHfZrTi high-entropy alloy / N.N. Guo, L. Wang, L.S. Luo, X.Z. Li, Y.Q. Su, J.J. Guo, H.Z. Fu // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 81. – P. 87–94. – DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.019.

133. Enhanced mechanical properties of HfMoTa-TiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys / C.-C. Juan, M.-H. Tsai, C.-W. Tsai, C.-M. Lin, W.-R. Wang, C.-C. Yang, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-W. Yeh // *Intermetallics*. – 2015. – Vol. 62. – P. 76–83. – DOI: 10.1016/j.intermet.2015.03.013.

134. Microstructure and mechanical properties at elevated temperatures of a new Al-containing refractory high-entropy alloy Nb-Mo-Cr-Ti-Al / H. Chen, A. Kauffmann, B. Gorr, D. Schliephake, C. Seemüller, J.N. Wagner, H.-J. Christ, M. Heilmaier // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 661. – P. 206–215. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.11.050.

135. Microstructure and mechanical properties of a refractory HfNbTiVSi0.5 high-entropy alloy composite / Y. Zhang, Y. Liu, Y. Li, X. Chen, H. Zhang // *Materials Letters*. – Vol. 174. – P. 82–85. – DOI: 10.1016/j.matlet.2016.03.092.

136. A fracture-resistance high-entropy alloy for cryogenic applications / B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor, E.H. Chang, E.P. George, R.O. Ritchie // *Science*. – 2014. – Vol. 345 (6201). – P. 1153–1158. – DOI: 10.1126/science.1254581.

137. Extremely polysubstituted magnetic material based on magnetoplumbite with a hexagonal structure: synthesis, structure, properties, prospects / D. Vinnik, V. Zhivulin, E. Trofimov, A. Starikov, D. Zherebtsov, O. Zaitseva, S. Gudkova, S. Taskaev, D. Klygach, M. Vakhitov, E. Sander, D. Sherstyuk, A. Trukhanov // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9 (4). – DOI: 10.3390/nano9040559.

138. Образование высокоэнтروпийных октаэдрических кристаллов в многокомпонентных оксидных системах / Д.А. Винник, Е.А. Трофимов, В.Е. Живулин, О.В. Зайцева, Т.А. Жильцова, Д.В. Репин // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Химия*. – 2019. – Т. 11, № 3. – С. 24–31. – DOI: 10/14529/chem190303.

139. Pullar R.C. Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics // *Progress in Materials Science*. – 2012. – Vol. 57 (7). – P. 1191–1334. – DOI: 10.1016/pmatsci.2012.04001.

140. Millimeter-wave characterization of aluminum substituted barium lead hexaferrite single crystals grown from PbO-B2O3 flux / D. Vinnik, I.A. Ustinova, A.B. Ustinov, S.A. Gudkova, D.A. Zherebtsov, E.A. Trofimov, N.S. Zabeivorota, G.G. Mikhailov, R. Nieva // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 17. – P. 15800–15804. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.145.

141. Структура и физические свойства быстрозакаленного из расплава высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNiCu / Н.И. Коуров, В.Г. Пушин, А.В. Королев, Ю.В. Князев, Н.Н. Куранова, М.В. Ивченко, Ю.М. Устюгов, Н. Вандерка // *Физика твердого тела*. – 2015. – Т. 57 (8). – С. 1579–1589.

142. Кинематическая вязкость жидких высокоэнтропийных сплавов Cu-Sn-In-Bi-Pb / О.А. Чикова, В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин, К.Ю. Шмакова // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – Спецвып. – С. 57–60. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-0-57-60.

143. Вьюхин В.В., Чикова О.А., Цепелев В.С. Поверхностное натяжение жидких высокоэнтропийных эквивалентных сплавов системы Cu-Sn-In-Bi-Pb // *Журнал физической химии*. – 2017. – Т. 91, № 4. – С. 582–585. – DOI: 10.7868/S0044453717040343.

144. Чикова О.А., Шмакова К.Ю., Цепелев В.С. Определение температур фазовых равновесий высокоэнтропийных металлических сплавов вискозиметрическим методом // *Металлы*. – 2016. – № 2. – С. 54–59.

145. Проектирование технологии получения высокоэнтропийных сплавов (припоев) системы Cu-Ga-Pb-Sn-Bi / О.А. Чикова, В.С. Цепелев, В.В. Вьюхин, К.Ю. Шмакова // *Металлург*. – 2015. – № 5. – С. 82–86.

146. Прогнозирование фазового состава высокоэнтропийных сплавов на основе Cr-Nb-Ti-V-Zr с помощью CALPHAD-метода / И.И. Горбачев, В.В. Попов, А. Кац-Демьянец, В. Попов мл., Э. Эшед // *Физика металлов и металловедение*. – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 408–416. – DOI: 10.1134/S0015323019040065.

147. Юрченко Н.Ю. Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. – Белгород, 2019. – 187 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 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



Review of alloys developed using the entropy approach

Zinaida Bataeva^{1, a}, Alexey Ruktuev^{2, b, *}, Ivan Ivanov^{2, c}, Aleksandr Yurgin^{2, d}, Ivan Bataev^{2, e}

¹ Siberian State University of water transport, 33 Schetinkina str., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-5027-6193>, bataevzb@ngs.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1325-1533>, ruktuev@corp.nstu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-5021-0098>, i.ivanov@corp.nstu.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0003-0473-7627>, yurgin2012@yandex.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0003-2871-0269>, i.bataev@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03 March 2021

Revised: 22 March 2021

Accepted: 17 April 2021

Available online: 15 June 2021

Keywords:

High-entropy alloys
 Multicomponent alloys
 Overview
 Composition
 Producing
 Plastic deformation
 Crystal structure
 Metastability
 Properties

Funding

This research was supported by Russian Science Foundation (project N 20-73-10215 "In-situ study of the evolution of the dislocation structure of plastically deformed high-entropy alloys under high pressures and temperatures using synchrotron radiation").

ABSTRACT

This paper provides a review of studies on the development and characterization of high-entropy alloys (HEAs). It is structured in the following way. **Alloys' design strategy based on entropy approach. Expectations and modern perceptions.** This section describes the initial principles of multicomponent alloys design which provide stable structure and mechanical properties. It is noted that the role of high mixing entropy in the formation of disordered solid solutions and the suppression of the brittle intermetallic phases formation have been significantly reconsidered over time. Currently, obtaining a single-phase solid solution structure is not the main requirement for HEAs. **The composition of HEAs.** This section describes some typical multicomponent alloys having different elemental compositions. It is shown, that at present time the most studied alloys are based on 3-d transition elements. **Fabrication methods of HEAs.** This section describes the methods for the fabrication of high-entropy alloys. It is noted that the most commonly used methods are based on the melting of the initial materials and its subsequent crystallization. Such methods of HEAs fabrication as powder metallurgy, magnetron sputtering, self-propagating high-temperature synthesis, melt spinning, and diffusion welding are also discussed. **Structure of HEAs.** This section provides the data on HEAs possessing multiphase structure and containing fine nanosized precipitates. Besides, the studies in which HEAs have been obtained in the form of metallic glasses, carbides, oxides, and borides are reviewed. The factors that can affect the structural state of the multicomponent alloys are discussed. The ambiguity of opinions of different research groups is noted. **Properties of HEAs.** This section mainly concentrates on the mechanical properties of HEAs. However, some other promising properties of HEAs like high wear resistance and reduced diffusivity are also discussed. **Plastic deformation of HEAs.** This section describes the evolution of the structure and properties of HEAs caused by thermal and mechanical processing. **Characterization methods of HEAs.** This section lists the characterization techniques, which are most frequently used to study HEAs. The structure of these alloys is mainly studied by scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, and optical microscopy. The methods for properties measurements are also briefly reviewed. **Application of HEAs.** This section describes the promising fields of HEAs application. It can be utilized in the aerospace, aircraft, and nuclear industries as well as for car manufacturing, acoustoelectronics, and in the design of microwave devices. **Russian-language publications on HEAs.** This section lists the studies, published in the Russian language as well as the thesis, done in Russian universities.

For citation: Bataeva Z.B., Ruktuev A.A., Ivanov I.V., Yurgin A.B., Bataev I.A. Review of alloys developed using the entropy approach. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 116–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146. (In Russian).

References

1. Yeh J.-W. *High-entropy multielement alloys*. Patent US, no. US 20020159914 A1, 2002.
2. 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

Ruktuev Alexey A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (383) 346-06-12, e-mail: ruktuev@corp.nstu.ru

3. 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.
4. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
5. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y., Lin S.-J., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, vol. 35, pp. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
7. Kuznetsov A.V., Salishchev G.A., Sen'kov O.N., Stepanov N.D., Shaisultanov D.G. Vliyanie mikrostruktury na mekhanicheskie svoystva pri rastyazhenii vysokoentropiynogo splava AlCoCrCuFeNi [Microstructure influence on tensile mechanical properties of an AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika = Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics*, 2012, vol. 11 (27), pp. 191–205.
8. Zhang Y. *High-entropy materials: a brief introduction*. Singapore, Springer Nature, 2019. 159 p. ISBN 978-981-13-8526-1.
9. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 2014, vol. 61, pp. 1–93. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.
10. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16 (9), pp. 4749–4768. DOI: 10.3390/e16094749.
11. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
12. Gao M.C., Yeh J.-W., Liaw P.K., Zhang Y., eds. *High-entropy alloys: fundamentals and applications*. Cham, Springer International Publishing, 2016. 524 p. ISBN 978-3-319-27013-5.
13. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 2018, vol. 61 (1), pp. 2–22. DOI: 10.1007/s40843-017-9195-8.
14. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. *High entropy alloys*. Amsterdam, Elsevier, 2014. 218 p. ISBN 9780128002513.
15. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-entropy alloys*. Amsterdam, Elsevier, 2019. 374 p. ISBN 978-0-12-816067-1.
16. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
17. Rogachev A.S. Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropiinykh splavov [Structure, stability and properties of high-entropy alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, no. 8, pp. 807–841. DOI: 10.31857/S0015323020080094. (In Russian).
18. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
19. Senkov O.N., Wilks G.B., Scott J.M., Miracle D.B. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. *Intermetallics*, 2011, vol. 11, pp. 698–706. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.01.004.
20. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P., Chen G.L., Liaw P.K. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 10 (6), pp. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
21. Klimova M.V. Vliyanie deformatsionno-termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva vysokoentropiinykh splavov sistemy Co-Cr-Fe-Mn-Ni(Al, C). Diss. kand. tekhn. nauk [Influence of deformation-heat treatment on the structure and mechanical properties of high entropy alloys of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni (Al, C) system. PhD eng. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2019. 151 p.
22. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Struktura i svoystva vysokoentropiynogo splava CoCrCuFeNiSn_x [Structure and properties of high-entropy CoCrCuFeNiSn_x alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 7, pp. 737–741. DOI: 10.7868/S0015323014040020. (In Russian).
23. Firstov S.A., Gorban' V.F., Krapivka N.A., Pechkovskii E.P. Novyi klass materialov – vysokoentropiinye splavy i pokrytiya [New class of materials – high entropy alloys and coatings]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1938–1940.
24. Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings from high-entropy multicomponent Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy. *Powder Metallurgy and Metal*

Ceramic, 2014, vol. 52, pp. 560–566. DOI: 10.1007/s11106-014-9560-z. Translated from *Poroshkovaya metallurgiya*, 2013, no. 9–10, pp. 93–102.

25. Oates W.A. Configurational entropies of mixing in solid alloys. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2007, vol. 28, pp. 79–89. DOI: 10.1007/s11669-006-9008-3.

26. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bol'shakova A.N. Problemy sozdaniya i perspektivy ispol'zovaniya zharoprochnykh vysokoentropiinykh splavov [Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2018, no. 5, pp. 3–8.

27. Gorban' V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Vysokoentropiinye splavy – elektronnaya kontsentratsiya – fazovyi sostav – parametr reshetki – svoistva svoistva [High-entropy alloys: Interrelations between electron concentration, phase composition, lattice parameter, and properties]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 10, pp. 1017–1029. DOI: 10.7868/S0015323017080058. (In Russian).

28. Manzoni A., Daoud H., Volkl R., Glatzel U., Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*, 2013, vol. 163, pp. 184–189. DOI: 10.1016/j.ultramic.2012.12.015.

29. Otto F., Yang Y., Bei H., George E.P. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61 (7), pp. 2628–2638. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.01.042.

30. Tong C.-J., Chen Y.-L., Yeh J.-W., Lin S.-J., Chen S.-K., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2005, vol. 36, pp. 881–893. DOI: 10.1007/s11661-005-0283-0.

31. Ivchenko M.I., Pushin V.G., Uksusnikov A.N., Wanderka N. Osobennosti mikrostruktury litykh vysokoentropiinykh splavov AlCrFeCoNiCu [Microstructure features of high-entropy equiatomic cast AlCrFeCoNiCu alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2013, vol. 114, no. 6, pp. 561–568. DOI: 10.7868/S0015323013060065. (In Russian).

32. Takeuchi A., Chen N., Wada T., Yokoyama Y., Kato H., Inoue A., Yeh J.W. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter. *Intermetallics*, 2011, vol. 19 (10), pp. 1546–1554. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.030.

33. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMox alloys. *Materials Characterization*, 2012, vol. 70, pp. 63–67. DOI: 10.1016/j.matchar.2012.05.005.

34. Cantor B. Stable and metastable multicomponent alloys. *Annales de Chimie Science des Matériaux*, 2007, vol. 32 (3), pp. 245–256. DOI: 10.3166/acsm.32.245-256.

35. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2014, vol. 2 (3), pp. 107–123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690.

36. Ivchenko M.V., Pushin V.G., Vanderka N. Vysokoentropiinye ekvatomnye splavy AlCrFeCoNiCu: gipotezy i eksperimental'nye fakty [High-entropy equiatomic AlCrFeCoNiCu alloy: hypotheses and experimental data]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 84, no. 2, pp. 57–69. (In Russian).

37. Tung C.C., Yeh J.W., Shun T.T., Chen S.-K., Huang Y.-S., Chen H.-C. On the elemental effect of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy system. *Materials Letters*, 2007, vol. 61 (1), pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.matlet.2006.03.140.

38. Wen L.H., Kou H.C., Li J.S., Chang H., Hue X.Y., Zhou L. Effect of aging temperature on microstructure and properties of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Intermetallics*, 2009, vol. 17 (4), pp. 266–269. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.08.012.

39. Tong C.-J., Chen M.-R., Yeh J.-W., Lin S.-J., Chen S.-K., Shun T.-T., Chang S.-Y. Mechanical performance of the Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2005, vol. 36 (5), pp. 1263–1271. DOI: 10.1007/s11661-005-0218-9.

40. Braic V., Vladescu A., Balaceanu M., Luculescu C.R., Braic M. Nanostructured multi-element (TiZrNbHfTa)C hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 211, pp. 117–121. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.09.033.

41. Lin M.I., Tsai M.H., Shen W.H., Yeh J.W. Evolution of structure and properties of multi-component (AlCrTaTiZr)O_x films. *Thin Solid Films*, 2010, vol. 518, pp. 2732–2737. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.142.

42. Gu J., Zou J., Sun S.-K., Wang H., Yu S.-Y., Zhang J., Wang W., Fu Z. Dense and pure high-entropy metal diboride ceramics sintered from self-synthesized powders via boro/carbothermal reduction approach. *Science China Materials*, 2019, vol. 62 (12). – P. 1898–1909. DOI: 10.1007/s40843-019-9469-4.

43. Chang S.Y., Lin S.Y., Huang Y.C., Wu S.L. Mechanical properties, deformation behaviors and interface adhesion of (AlCrTaTiZr)N_x multi-component coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 204 (20), pp. 3307–3314. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.03.041.

44. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E., Zaitseva O.V., Starikov A.Yu., Zhil'tsova T.A., Savina Yu.D., Gudkova S.A., Zherebtsov D.A., Popova D.A. Tverdogaznyi sintez vysokoentropiinykh kristallov so strukturoi



magnetoplumbita v sisteme $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ [Solid-phase synthesis of high-entropy crystals with the magnetoplumbite structure in the $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ system]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 32–39. DOI: 10.14529/chem190304.

45. Jiang S., Hu T., Gild J., Zhou N., Nie J., Qin M., Harrington T., Vecchio K., Luo J.A. New class of high-entropy perovskite oxides. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 142, pp. 116–120. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.08.040.

46. Dabrova J., Stygar M., Mikula A., Knapik A., Danielewski M., Mroczka K., Tejchman W., Martin M. Synthesis and microstructure of the $(\text{Co,Cr,Fe,Mn,Ni})_3\text{O}_4$ high entropy oxide characterized by spinel structure. *Materials Letters*, 2018, vol. 216, pp. 32–36. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.12.148.

47. Velo I.L., Gotor F.J., Alcalá M.D., Real C., Córdoba J.M. Fabrication and characterization of WC-HEA cemented carbide based on the CoCrFeNiMn high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 746, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.292.

48. De la Odra A.G., Sayagues M.J., Chicardi E., Gotor F.J. Development of Ti(C, N)-based cermets with (Co, Fe, Ni)-based high entropy alloys as binder phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 814, art. 152218. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.152218.

49. Li Z., Liu X., Guo K., Wang H., Cai B., Chang F., Hong C., Dai P. Microstructure and properties of Ti(C, N)- TiB_2 -FeCoCrNiAl high-entropy alloys composite cermets. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 767, art. 138427. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138427.

50. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippin R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*, 2015, vol. 96, pp. 258–268. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.025.

51. Nadutov V.M., Makarenko S.Yu., Volosevich P.Yu. Vliyanie alyuminiya na tonkuyu strukturu i raspredelenie khimicheskikh elementov v vysokoentropiinykh splavakh $\text{Al}_x\text{FeNiCoCuCr}$ [Effect of aluminum on fine structure and distribution of chemical elements in high-entropy alloys $\text{Al}_x\text{FeNiCoCuCr}$]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 5, pp. 467–472. DOI: 10.7868/S0015323015030092. (In Russian).

52. Zhang L.J., Guo K., Tang H., Zhang M.D., Fan J.T., Cui P., Ma Y.M., Yu P.F., Li G. The microstructure and mechanical properties of novel Al-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys with trimodal distributions of coherent B2 precipitates. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 757, pp. 160–171. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.104.

53. Krapivka N.A., Firstov S.A., Karpets M.V., Myslivchenko A.N., Gorban' V.F. Osobennosti fazoobrazovaniya i formirovaniya struktury v vysokoentropiinykh splavakh sistemy AlCrFeCoNiCu_x ($x = 0; 0.5; 1.0; 2.0; 3.0$) [Features of phase and structure formation in high-entropy alloys of the AlCrFeCoNiCu_x system ($x = 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$)]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 5, pp. 496–504. DOI: 10.7868/S0015323015030080. (In Russian).

54. Gu J., Ni S., Liu Y., Song M. Regulating the strength and ductility of a cold rolled FeCrCoMnNi high-entropy alloy via annealing treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 755, pp. 289–294. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.025.

55. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V., Meisenkothen F., Miracle D.B., Woodward C.F. Microstructure and elevated temperature properties of a refractory TaNbHfZrTi alloy. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, pp. 4062–4074. DOI: 10.1007/s10853-012-6260-2.

56. Tang W.-Y., Yeh J.-W. Effect of aluminum content on plasma-nitrided $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloys. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2009, vol. 40, pp. 1479–1486. DOI: 10.1007/s11661-009-9821-5.

57. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*, 2013, vol. 39, pp. 74–78. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.03.018.

58. Otto F., Dlouhy A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influence of temperature and microstructure on tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Metallurgica*, 2013, vol. 61, pp. 5743–5755. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.06.018.

59. Ma X., Chen J., Wang X., Hu Y., Hue Y. Microstructure and mechanical properties of cold drawing CoCrFeMnNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 795, pp. 45–53. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.04.296.

60. Shaisultanov D.G., Stepanov N.D., Salishchev G.A., Tikhonovskii M.A. Vliyanie termicheskoi obrabotki na strukturu i tverdosť vysokoentropiinykh splavov CoCrFeNiMnV_x ($x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$) [Effect of heat treatment on the structure and hardness of high-entropy alloys CoCrFeNiMnV_x ($x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$)]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 6, pp. 610–621. DOI: 10.7868/S0015323017060080. (In Russian).

61. Zhang K.B., Fu Z.Y., Zhang J.Y., Shi J., Wang W.M., Wang H., Wang Y.C., Zhang Q.J. Nanocrystalline CoCrFeNiCuAl high-entropy solid solution synthesized by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 485, iss. 1–2, pp. L31–L34. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.05.144.
62. Chen W.P., Fu Z.Q., Fang S.C., Xiao H.Q., Zhu D.Z. Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNiCrCo_{0.3}Al_{0.7} high entropy alloy. *Materials and Design*, 2013, vol. 51, pp. 854–860. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.061.
63. Ji W., Wang W., Wang H., Zhang J., Wang Y., Zhang F., Fu Z. Alloying behavior and novel properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Intermetallics*, 2015, vol. 56, pp. 24–27. DOI: 10.1016/j.intermet.2014.08.008.
64. Moravcik I., Cizek J., Zapletal J., Kvasova Z., Vesely J., Minarik P., Kitzmantel M., Neubauer E., Dlouhy I. Microstructure and mechanical properties of Ni_{1.5}Co_{1.5}CrFeTi_{0.5} high entropy alloy fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Materials and Design*, 2017, vol. 119, pp. 141–150. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.036.
65. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shchukin A.S., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Mekhanicheskoe splavlenie s chastichnoi amorfizatsiei mnogokomponentnoi poroshkovoi smesi Fe-Cr-Co-Ni-Mn i ee elektroiskrovoye plazmennoe spekanie dlya polucheniya kompaktnogo vysokoentropiynogo materiala [Mechanical alloying with partial amorphization of Fe-Cr-Co-Ni-Mn multicomponent powder mixture and its spark plasma sintering for compact high-entropy material production]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Universities' Proceedings. Powder metallurgy and functional coatings*, 2018, no. 2, pp. 35–42. DOI: 10.17073/1997-308X-2018-2-35-42.
66. Prusa F., Senkova A., Kusera V., Capek J., Vojtech D. Properties of high-strength ultrafine-grained CoCrFeNiMn high-entropy alloy prepared by short-term mechanical alloying and spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 734, pp. 341–352. DOI: 10.1016/j.msea.2018.08.014.
67. Alcala M.D., Real C., Fombella I., Trigo I., Cordoba J.M. Effects of milling time, sintering temperature, Al content on the chemical nature, microhardness and microstructure of mechanically synthesized FeCoNiCrMn high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 749, pp. 834–843. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.358.
68. Varalakshmi S., Rao G.A., Kamaraj M., Murty B.S. Hot consolidation and mechanical properties of nanocrystalline equiatomic AlFeTiCrZnCu high entropy alloy after mechanical alloying. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, pp. 5158–5163. DOI: 10.1007/s10853-010-4246-5.
69. Vadchenko S.G., Rogachev A.S., Kovalev D.Yu., Kovalev I.D., Mukhina N.I. TiZrNiCuAl and TiNbNiCuAl alloys by thermal explosion and high-energy ball milling. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2019, vol. 28 (2), pp. 137–142. DOI: 10.3103/S1061386219020122.
70. Rogachev A.S., Mukas'yan A.S. *Gorenie dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku* [Combustion for the synthesis of materials: Introduction to structural macrokinetics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 398 p. ISBN 978-5-9221-1441-7.
71. Sanin V.N., Yukhvid V.I., Ikornikov D.M., Andreev D.E., Sachkova N.V., Alymov M.I. SVS-metallurgiya litykh vysokoentropiinykh splavov na osnove perekhodnykh metallov [SHS metallurgy of high-entropy transition metal alloys]. *Doklady Akademii nauk = Doklady physical chemistry*, 2016, vol. 470, no. 4, pp. 421–426. DOI: 10.7868/S0869565216280124.
72. Shen W.J., Tsai M.-H., Chang Y.-S., Yeh J.-W. Effects of substrate bias on the structure and mechanical properties of (Al_{1.5}CrNb_{0.5}Si_{0.5}Ti)_{N_x} coatings. *Thin Solid Films*, 2012, vol. 520, pp. 6183–6188. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.06.002.
73. Dolique V., Thomann A.L., Brault P. High-entropy alloys deposited by magnetron sputtering. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39 (11), pp. 2478–2479. DOI: 10.1109/TPS.2011.2157942.
74. Chang H.W., Huang P.K., Yeh J.W., Davison A., Tsau C.H., Yang C.C. Influence of substrate bias, deposition temperature and post-deposition annealing on the structure and properties of multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 202, pp. 3360–3366. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.12.014.
75. Cao Z.H., Ma Y.J., Cai Y.P., Wang G.J., Meng X.K. High strength dual-phase high entropy alloys with a tunable monolayer thickness. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 173, pp. 149–153. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.08.018.
76. Wei R., Tao J., Sun H., Chen C., Sun G.W., Li F.S. Soft magnetic Fe_{26.7}Co_{26.7}Ni_{26.6}Si₉B₁₁ high entropy metallic glass with good bending ductility. *Materials Letters*, 2017, vol. 197, pp. 87–89. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.03.159.
77. Tong Y., Qiao J.C., Pelletier J.M., Yao Y. Strong metallic glass: TiZrHfCuNiBe high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 820, art. 153119. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.153119.
78. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Struktura i svoistva litykh i zhidkozakalennykh vysokoentropiinykh splavov sistemy Al-Cu-Fe-Ni-Si [Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al-Cu-Fe-Ni-Si alloys]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, no. 1, pp. 42–50. DOI: 10.7868/S001532301610003X. (In Russian).

79. Firstov S.A., Karpov M.I., Gorban' V.F., Korzhov V.P., Krapivka N.A., Stroganova T.S. Struktura i mekhanicheskie svoistva zharoprochnogo kompozita na osnove vysokoentropiinogo splava [The structure and mechanical properties of heat resistant composite material based of high entropy alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2015, vol. 81, no. 6, pp. 28–33. (In Russian).
80. Firstov S.A., Karpov M.I., Korzhov V.P., Gorban' V.F., Krapivka N.A., Stroganova T.S. Struktura i svoistva sloistogo kompozita iz vysokoentropiinogo splava s karbidnym i intermetallidnym uprochneniem [Structure and properties of a laminated composite material made of high-entropy alloy with carbide and intermetallic hardening]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 9, pp. 1267–1275. DOI: 10.7868/S0367676515090057. (In Russian).
81. Gasan H., Ozcan A. New eutectic high-entropy alloys based on Co-Cr-Fe-Mo-Ni-Al: design, characterization and mechanical properties. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 26, pp. 1152–1167. DOI: 10.1007/s12540-019-00515-9.
82. Shaisultanov D.G. *Struktura i mekhanicheskie svoistva vysokoentropiinykh splavov sistemy CoCrFeNiX (X=Mn, V, Mn i V, Al i Cu)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Structure and mechanical properties of high-entropy alloys of CoCrFeNiX system (X = Mn, V, Mn and V, Al and Cu). PhD eng. sci. diss.]. Belgorod, 2015. 142 p.
83. Lucas M.S., Wilks G.B., Mauger L., Munoz J.A., Senkov O.N., Michel E., Horwath J., Semiatin S.L., Stone M.B., Abernathy D.L., Karapetrova E. Absence of long-range chemical ordering in equimolar FeCoCrNi. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100 (25), art. 251907. DOI: 10.1063/1.4730327.
84. Owen L.R., Pickering E.J., Playford H.Y., Stone H.J., Tucker M.G., Jones N.G. An assessment of the lattice strain in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.09.032.
85. Bhattacharjee P.P., Sathiaraj G.D., Zaid M., Gatti J.R., Lee C., Tsai C.-W., Yeh J.-W. Microstructure and texture evolution during annealing of equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 587, pp. 544–552. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.10.237.
86. Gludowatz B., George E.P., Rithie R.O. Processing, microstructure and mechanical properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *JOM*, 2015, vol. 67 (10), pp. 2262–2270. DOI: 10.1007/s11837-015-1589-z.
87. He J.Y., Zhu C., Zhou D.Q., Liu W.H., Nieh T.G., Li Z.P. Steady state flow of the FeCoNiCrMn high entropy alloy at elevated temperatures. *Intermetallics*, 2014, vol. 55, pp. 9–14. DOI: 10.1016/j.intermet.2014.06.015.
88. Otto F., Dlouhý A., Pradeep K.G., Kuběnova M., Raabec D., Eggeler G., George E.P. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures. *Acta Materialia*, 2016, vol. 112, pp. 40–52. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.04.005.
89. Cieslac J., Tobola J., Przewoznik J., Berent K., Dahlborg U., Cornide J., Mehraban S., Lavery N., Calvo-Dahlborg M. Multi-phase nature of sintered vs. arc-melted CrxAlFeCoNi high entropy alloys – experimental and theoretical study. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 801, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.121.
90. Tang Y., Wang R., Li S., Liu X., Ye Y., Zhu L., Bai S., Xiao B. Effect of metastability on non-phase-transformation high-entropy alloys. *Materials and Design*, 2019, vol. 181, art. 107928. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107928.
91. Wang R., Tang Y., Li S., Zhang H., Ye Y., Zhu L., Ai Y., Bai S. Novel metastable engineering in single-phase high-entropy alloy. *Materials and Design*, 2019, vol. 162, pp. 256–262. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.052.
92. Pacheco V., Lindwall G., Karlsson D., Cedervall J., Fritze S., Ek G., Berastegui P., Sahlberg M., Jansson U. Thermal stability of the HfNbTiVZr high-entropy alloy. *Inorganic Chemistry*, 2019, vol. 58, pp. 811–820. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b02957.
93. Poulia A., Georgatis E., Mathiou C., Karantzalis A.E. Phase segregation discussion in a $\text{Hf}_{25}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{20}\text{Nb}_{15}\text{V}_{10}$ high entropy alloy: the effect of the high melting point element. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 210, pp. 251–258. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.09.059.
94. Shim S.H., Oh S.M., Lee J., Hong S.-K., Hong S.I. Nanoscale modulated structures by balanced distribution of atoms and mechanical/structural stabilities in CoCuFeMnNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 762, art. 138120. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138120.
95. Yurchenko N.Yu., Stepanov N.D., Grigneva A.O., Michunin M.V., Salishchev G.A., Zherebtsov S.V. Effect of Cr and Zr on phase stability of refractory Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 757, pp. 403–414. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.099.
96. Shahmir H., Nili-Ahmadabadi M., Shafiee A., Andrzejczuk M., Lewandowska M., Langdon T.G. Effect of Ti on phase stability and strengthening mechanisms of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 725, pp. 196–206. DOI: 10.1016/j.msea.2018.04.014.
97. Meng Y.H., Duan F.H., Pan J., Li Y. Phase stability of B2-ordered ZrTiHfCuNiFe high entropy alloy. *Intermetallics*, 2019, vol. 111, art. 106515. DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106515.

98. Liao M., Liu Y., Min L., Lai Z., Han T., Yang D., Zhu J. Alloying effect on phase stability, elastic and thermodynamic properties of Nb-Ti-V-Zr high entropy alloy. *Intermetallics*, 2018, vol. 101, pp. 152–164. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.08.003.
99. Qiu S., Miao N., Guo Z., Zhou J., Sun Z. Local-ordering mediated configuration stability and elastic properties of aluminum-containing high entropy alloys. *Intermetallics*, 2019, vol. 110, art. 106474. DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106474.
100. Ikeda Y., Grabowski B., Körmann F. Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicomponent alloys: a comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys. *Materials Characterization*, 2019, vol. 147, pp. 464–511. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.06.019.
101. Laplanche G., Berglund S., Reinhart C., Kostka A., Fox F., George E.P. Phase stability and kinetics of σ -phase precipitation in CrMnFeCoNi high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2018, vol. 161, pp. 338–351. DOI: 10.1016/j.actamat.2018.09.040.
102. Ivchenko M.V. *Struktura, fazovye prevrashcheniya i svoystva vysokoentropiinykh metallicheskich splavov na osnove AlCrCoNiCu*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Structure, phase transformations, and properties of high entropy AlCrCoNiCu alloys. PhD. phys. and math. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2015. 167 p.
103. Karpets M.V., Gorban' V.F., Myslivchenko O.M., Marchenko S.V., Krapivka M.O. Vliyanie sodержaniya nikelya na iznosostoykost' litogo vysokoentropiinogo splava VCrMnFeCoNi_x [Effect of the nickel content on the wear resistance of the cast high-entropy VCrMnFeCoNi_x alloy]. *Sovremennaya elektrometallurgiya = Electrometallurgy Today*, 2015, no. 1, pp. 56–60. DOI: 10.15407/sem2015.01.09.
104. Yeh J.-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*, 2013, vol. 65 (12), pp. 1759–1771. DOI: 10.1007/s11837-013-0761-6.
105. Hsu C.-Y., Juan C.-C., Wang W.-R., Sheu T.-S., Yeh J.-W., Chen S.-K. On the superior hot hardness and softening resistance of AlCoCrFeMo_{0.5}Ni high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, pp. 3581–3588. DOI: 10.1016/j.msea.2011.01.072.
106. Shun T.-T., Hung C.-H., Lee C.-F. Formation of ordered/disordered nanoparticles in FCC high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 493, pp. 105–109. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.12.071.
107. Tsai K.-Y., Tsai M.-H., Yeh J.-W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 4847–4897. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.04.058.
108. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Microstructure and compressive properties of multicomponent Al_x(TiVCrMnFeCoNiCu)_{100-x} high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, vol. 454–455, pp. 260–265. DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.049.
109. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, art. 181904. DOI: 10.1063/1.2734517.
110. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi_{0.5} solid solution alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, vol. 466 (1–2), pp. 201–204. DOI: 10.1016/j.jallcom.2007.11.110.
111. Alaneme K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2016, vol. 5 (4), pp. 384–393. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.004.
112. Kim D.G., Jo Y.H., Yang J., Choi W.-M., Kim H.S., Lee B.-J., Sohn S.S., Lee S. Ultrastrong duplex high-entropy alloy with 2 GPa cryogenic strength enabled by an accelerated martensitic transformation. *Scripta Materialia*, 2019, vol. 171, pp. 67–72. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.06.026.
113. Ospennikova O.G. Strategiya razvitiya zharoprochnykh splavov i stalei spetsial'nogo naznacheniya, zashchitnykh i teplozashchitnykh pokrytii [Development strategies of high-temperature alloys and special steels, protective and thermoprotective coatings]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation materials and technologies*, 2012, no. S, pp. 19–36.
114. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye liteinye zharoprochnye splavy novogo pokoleniya [Ni-base casting superalloy of the new generation]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation materials and technologies*, 2012, no. S, pp. 36–52.
115. Firstov S.A., Gorban' V.F., Krapivka N.A., Pechkovskii E.P., Danilenko N.I., Karpets M.V. Mekhanicheskie svoystva litykh mnogokomponentnykh splavov pri vysokikh temperaturakh [Mechanical properties of cast multicomponent alloys at high temperatures]. *Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya = Modern problems of physical materials science*, 2009, iss. 18, pp. 140–147.
116. Ma L.Q., Wang L.M., Zhang T., Inoue A. Bulk glass formation on Ti-Zr-Hf-Cu-M (M=Fe, Co, Ni) alloys. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, pp. 277–280. DOI: 10.2320/matertrans.43.277.



117. Cheng K.-H., Lai C.-H., Lin S.-J., Yeh J.-W. Structural and mechanical properties of multi-element (AlCrMoTaTiZr)_{Nx} coatings by reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 2011, vol. 519, pp. 3185–3190. DOI: 10.1016/j.tsf.2010.11.034.
118. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V., Miracle D.B., Woodward C.F. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy. *Journal of alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 043–6048. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.02.171.
119. Firstov S.A., Rogul' T.G., Krapivka N.A., Ponomarev S.S., Tkach V.N., Kovylyayev V.V., Norban' V.F., Karpets M.V. Tverdorastvornoe uprochnenie vysokoentropiinogo splava AlTiVCrNbMo [Solid-solution hardening of a high-entropy AlTiVCrNbMo alloy]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian metallurgy (Metally)*, 2013, no. 2, pp. 9–16. (In Russian).
120. Kao Y.-F., Chen T.-J., Chen S.-K., Yeh J.-W. Microstructure and mechanical property of as-cast, -homogenized, and -deformed Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 488 (1), pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.08.090.
121. Tsai C.W., Tsai M.H., Yeh J.W., Yang C.C. Effect of temperature on mechanical properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi wrought alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 490 (1–2), pp. 160–165. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.10.088.
122. Kuznetsov A.V., Salishchev G.A., Sen'kov O.N., Stepanov N.D., Shaisultanov D.G. Vliyanie mikrostruktury na mekhanicheskie svoystva pri rastyazhenii vysokoentropiinogo splava AlCoCrCuFeNi [Microstructure influence on tensile mechanical properties of an AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika = Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics*, 2012, no. 11, pp. 182–186.
123. He F., Wang Z., Wu Q., Wang J., Liu C.T. Phase separation of metastable CoCrFeNi high entropy alloy at intermediate temperatures. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 126, pp. 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.08.008.
124. Huang Y.-C., Tsao C.-S., Wu S.-K., Lin C., Chen C.-H. Nano-precipitates in severely deformed and low-temperature aged CoCrFeMnNi high-entropy alloy studied by synchrotron small-angle X-ray scattering. *Intermetallics*, 2019, vol. 105, pp. 146–152. DOI: 10.1016/j.intermet.2018.12.003.
125. Dahlborg U., Cornide J., Calvo-Dahlborg M., Hansen T.S., Fitch A., Leong Z., Chambrelaud S., Goodal R. Structure of some CoCrFeNi and CoCrFeNiPd multicomponent HEA alloys by diffraction techniques. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 681, pp. 330–341. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.248.
126. Senkov O.N., Zhang C., Pilchak A.L., Payton E.J., Woodward C., Zhang F. CALPHAD-aided development of quaternary multi-principal element refractory alloys based on NbTiZr. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 783, pp. 729–742. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.325.
127. Miracle D.B., Miller J.D., Senkov O.N., Woodward C., Uchic M.D., Tiley J. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications. *Entropy*, 2014, vol. 16 (1), pp. 494–525. DOI: 10.3390/e16010494.
128. Raturi A., Aditya C.J., Gurao N.P., Biswas K. ICME approach to explore equiatomic and non- equiatomic single phase BCC refractory high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 806, pp. 587–595. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.387.
129. Menou E., Tancet F., Toda-Caraballo I., Ramstein G., Castany P., Bertrand E., Gautier N., Rivera Diaz-Del-Castillo P.E.J. Computational design of light and strong high entropy alloys (HEA): obtainment of an extremely high specific solid solution hardening. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 156, pp. 120–123. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.07.024.
130. Komarov F.F., Pogrebnyak A.D., Konstantinov S.V. Radiatsionnaya stoikost' vysokoentropiinykh nanostrukturirovannykh pokrytii (Ti, Hf, Zr, V, Nb) N [Radiation resistance of high-entropy nanostructured (Ti, Hf, Zr, V, Nb)N coatings]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, no. 85 (10), pp. 105–110. (In Russian).
131. Tsai M.-H., Wang C.-W., Lai C.-H., Yeh J.-W., Can J.-Y. Thermally stable amorphous (AlMoNbSiTaTiVZr)_{50N50} nitride film as diffusion barrier in copper metallization. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, art. 052109. DOI: 10.1063/1.2841810.
132. Guo N.N., Wang L., Luo L.S., Li X.Z., Su Y.Q., Guo J.J., Fu H.Z. Microstructure and mechanical properties of refractory MoNbHfZrTi high-entropy alloy. *Materials and Design*, 2015, vol. 81, pp. 87–94. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.019.
133. Juan C.-C., Tsai M.-H., Tsai C.-W., Lin C.-M., Wang W.-R., Yang C.-C., Chen S.-K., Lin S.-J., Yeh J.-W. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 2015, vol. 62, pp. 76–83. DOI: 10.1016/j.intermet.2015.03.013.
134. Chen H., Kauffmann A., Gorr B., Schliephake D., Seemüller C., Wagner J.N., Christ H.-J., Heilmaier M. Microstructure and mechanical properties at elevated temperatures of a new Al-containing refractory high-

entropy alloy Nb-Mo-Cr-Ti-Al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 661, pp. 206–215. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.11.050.

135. Zhang Y., Liu Y., Li Y., Chen X., Zhang H. Microstructure and mechanical properties of a refractory HFNbTiVSi0.5 high-entropy alloy composite. *Materials Letters*, 2016, vol. 174, pp. 82–85. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.03.092.

136. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 2014, vol. 345 (6201), pp. 1153–1158. DOI: 10.1126/science.1254581.

137. Vinnik D., Zhivulin V., Trofimov E., Starikov A., Zherebtsov D., Zaitseva O., Gudkova S., Taskaev S., Klygach D., Vakhitov M., Sander E., Sherstyuk D., Trukhanov A. Extremely polysubstituted magnetic material based on magnetoplumbite with a hexagonal structure: synthesis, structure, properties, prospects. *Nanomaterials (Basel)*, 2019, vol. 9 (4). DOI: 10.3390/nano9040559.

138. Vinnik D.A., Trofimov E.A., Zhivulin V.E., Zaitseva O.V., Zhil'tsova T.A., Repin D.V. Obrazovanie vysokoentropiinykh oktaedricheskikh kristallov v mnogokomponentnykh oksidnykh sistemakh [Formation of high-entropy octahedral crystals in multicomponent oxide systems]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya = Bulletin of the South Ural state university. Series: Chemistry*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 24–31. DOI: 10.14529/chem190303.

139. Pullar R.C. Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 2012, vol. 57 (7), pp. 1191–1334. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2012.04001.

140. Vinnik D., Ustinova I.A., Ustinov A.B., Gudkova S.A., Zherebtsov D.A., Trofimov E.A., Zabeivorota N.S., Mikhailov G.G., Nieva R. Millimeter-wave characterization of aluminum substituted barium lead hexaferrite single crystals grown from PbO-B2O3 flux. *Ceramics International*, 2017, vol. 17, pp. 15800–15804. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.08.145.

141. Kourov N.I., Pushin V.G., Korolev A.V., Knyazev Yu.V., Kuranova N.N., Ivchenko M.V., Ustyugov Yu.M., Vanderka N. Struktura i fizicheskie svoystva bystrozakalennogo iz rasplava vysokoentropiinogo splava AlCrFeCoNiCu [Structure and physical properties of the high-entropy AlCrFeCoNiCu alloy rapidly quenched from the melt]. *Fizika tverdogo tela = Physics of the Solid State*, 2015, no. 57 (8) pp. 1579–1589.

142. Chikova O.A., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V., Shmakova K.Yu. Kinematicheskaya vyazkost' zhidkikh vysokoentropiinykh splavov Cu-Sn-In-Bi-Pb [Kinetic viscosity of molten high entropy alloys Cu-Sn-In-Bi-Pb]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, special issue, pp. 57–60. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-0-57-60. (In Russian).

143. V'yukhin V.V., Chikova O.A., Tsepelev V.S. Poverkhnostnoe natyazhenie zhidkikh vysokoentropiinykh ekvatomnykh splavov sistemy Cu-Sn-In-Bi-Pb [Surface tension of liquid high-entropy equiatomic alloys of a Cu-Sn-In-Bi-Pb system]. *Zhurnal fizicheskoi khimii = Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2017, vol. 91, no. 4, pp. 582–585. DOI: 10.7868/S0044453717040343. (In Russian).

144. Chikova O.A., Shmakova K.Yu., Tsepelev V.S. Opredelenie temperatur fazovykh ravnovesii vysokoentropiinykh metallicheskh splavov viskozimetricheskim metodom [Determination of the phase equilibrium temperature of high-entropy alloys by the viscometric method]. *Metally = Russian metallurgy (Metally)*, 2016, no. 2, pp. 54–59. (In Russian).

145. Chikova O.A., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V., Shmakova K.Yu. Proektirovanie tekhnologii polucheniya vysokoentropiinykh splavov (pripoev) sistemy Cu-Ga-Pb-Sn-Bi [Planning technology for preparing high-entropy alloys (solders) of the Cu-Ga-Pb-Sn-Bi system]. *Metallurg = Metallurgist*, 2015, no. 5, pp. 82–86.

146. Gorbachev I.I., Popov V.V., Kats-Dem'yanets A., Popov V. ml., Eshed E. Prognozirovanie fazovogo sostava vysokoentropiinykh splavov na osnove Cr-Nb-Ti-V-Zr s pomoshch'yu CALPHAD-metoda [Prediction of the phase composition of high-entropy alloys based on Cr-Nb-Ti-V-Zr using the calphad method]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2019, vol. 120, no. 4, pp. 408–416. DOI: 10.1134/S0015323019040065. (In Russian).

147. Yurchenko N.Yu. *Razrabotka i issledovanie vysokoentropiinykh splavov s vysokoi udel'noi prochnost'yu na osnove sistemy Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of high-entropy alloys with high specific strength based on Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr system. PhD eng. sci. diss.]. Belgorod, 2019. 187 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 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/>).